



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA



**Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales
y Puertos de Barcelona**

Doctorado en Ingeniería Civil

**Análisis del ciclo de vida de productos derivados del
cemento – *Aportaciones al análisis de los inventarios
del ciclo de vida del cemento***

Tesis doctoral

Realizada por

Arnaldo Cardim de Carvalho Filho

Dirigida por

Antonio Aguado de Cea

Alejandro Josa García-Tornel

Dedicación

*A Nilza, mi mujer y a nuestras hijas
Carol, Lilian y Marcia*

*A Memoria de mi Padre (Arnaldo Cardim)
y de mi hermano (Aldo Cardim)*

A mi Madre, hermanos y sobrinos

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar este trabajo, deseo expresar mis sinceros agradecimientos a todos aquellos que directa e indirectamente colaboraron en su elaboración. A los profesores Dr. Antonio Aguado de Cea y Dr. Alejandro Josa García-Tornel, directores de esta tesis, dirijo especial gratitud por el apoyo personal e institucional que me han dado a lo largo de todo este trabajo. Asimismo, quiero expresar mi gratitud por los datos de la campaña experimental a Mireia Viñals Mata.

Agradezco también la colaboración recibida de parte del Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) y, por la oportunidad de participar del proyecto ACV IECA/UPC origen, en gran medida, de esta tesis.

A la Universidad Politécnica de Cataluña, y a todas aquellas personas del Departamento de Ingeniería de la Construcción y de la Escuela Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, deseo agradecerles su cordial acogida y respaldo durante todo este período de convivencia.

Deseo agradecer institucionalmente a la Escola Politécnica de Pernambuco (Universidade de Pernambuco), y al Centro Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco – CEFETPE-, que a través de sus respectivos Directores (Armando Carneiro Pereira do Rego Filho y Ebenezer Paraíso Vilela) el apoyo incondicional que me ofrecieron para participar en este programa de doctorado.

Aún, en el ámbito institucional, deseo agradecer a la Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES- por la beca concedida, que financió parte de este doctorado.

Personalmente deseo expresar, conjuntamente con mi familia, nuestro agradecimiento a todos aquellos con quien tuvimos la fortuna de haber convivido a lo largo de estos años. Quiero expresar nuestra especial gratitud a Berenice y Gilberto Carbonari, Turibio da Silva, Ernesto Zangelmi, Osvaldo Manzoli, Israel Barcelos, Ana Paula Reis, Carlos D'Avila, Paulo Cesar Correa, José Luiz Rangel, Leonardo Guimarães, Pedro Sá, Juan Carlos Araiza, Moisés Ramírez, Guillermo Landa y a todos los que, aunque no estén mencionados, nos brindaron su amistad.

Asimismo, deseo comunicar a todos los amigos y familiares que quedaron en Brasil nuestra gratitud por el cariño y afecto demostrados a lo largo de todos estos años de separación. Sus palabras de apoyo, enviadas frecuentemente, y los gestos de cariño demostrados en diferentes ocasiones fueron de gran importancia para suplir la dura separación física.

RESUMEN

En esta tesis se estudian los efectos ambientales de la producción del cemento, incluyendo las diferentes etapas que componen su ciclo de vida, con objeto de estructurar y proponer las bases fundamentales de un **Inventario del Ciclo de Vida (ICV)** nacional de dicho producto.

Tras realizar un estudio sobre los ICV del cemento, existentes y disponibles en ámbito internacional, se analizan los límites aplicados a los diferentes subsistemas de producción y se estudia la viabilidad de utilización de estos ICV en el **análisis del ciclo de vida (ACV)** de los productos con base cemento. Este análisis se desarrolla a partir de un estudio comparativo de los datos de entradas y salidas de los distintos ICV de la producción de cemento disponibles, y demuestra la necesidad de estructurar los inventarios a través de distintos subsistemas de producción.

A partir de lo anterior, se plantea un modelo de inventario del ciclo de vida del cemento aplicable a España o a cualquier otro país con la misma técnica productiva. Se aporta el concepto de **memoria ambiental (MA)**, que permite utilizar el ACV desde distintos puntos de análisis (global, regional y local), con un tratamiento integrado de las diferentes prestaciones requeridas a un producto e incorporando otros efectos medioambientales que intervengan en los procesos de producción. Al mismo tiempo, este planteamiento permite realizar estudios por etapas (de la “cuna hasta la puerta” o de la “cuna hasta la tumba”) y por distintos niveles de análisis. Esta metodología se aplica en el desarrollo del inventario de un cemento específico.

Las conclusiones apuntan a la necesidad de elaborar un inventario nacional, representativo de la producción de cemento, como forma de garantizar una suficiente fiabilidad en los resultados de ACV de productos derivados del cemento.

ABSTRACT

In this thesis, the environmental effects of the Portland Cement Production, including its different life cycle stages, are studied. The main objective of the work is to structure and propose the fundamental bases of a national **Life Cycle Inventory (LCI)** of the portland cement.

Taking into account the available data sets of the cement's LCI, the system's boundaries of different production systems are verified and the use of these LCI in the environmental **Life Cycle Assessment (LCA)** of portland cement products is analysed. The analysis is based on a comparative study of the inputs and outputs of the different available cement production LCIs. The results show that it is necessary to change the structure of these LCIs, mainly considering the process steps.

Thereafter, a model of LCI applicable to cement produced in Spain or in another country with the same productive technique is presented. The concept of **environmental memory (EM)** is then introduced, allowing the use of the LCI according to different points of view, such as global, regional or local. It provides an integrated treatment of the different product performances, considering other environmental effects that are present in the production processes. The concept allows studying LCAs in different limit boundaries ("cradle to gate" or "cradle to grave") and different analysis levels. This methodology is applied in the development of the inventory of specific portland cement.

The conclusions show that it is necessary to build a national inventory, which really represents the portland cement production as the only way to guarantee the reliability of the LCA results applied to portland cement products.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	
Resumen	I
Abstract	II

CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN

1.1 – Antecedentes	1
1.2 – Objetivos	3
1.3 – Metodología	4

CAPÍTULO 2 - ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1 – Introducción	7
2.2 - La construcción y el medio ambiente	8
2.2.1 - El ciclo de vida del producto de la construcción	10
2.2.2 - Políticas medioambientales relacionadas con el sector de la construcción	15
2.3 - Sistemas de evaluación medioambiental	16
2.4 - El análisis del ciclo de vida – ACV -	22
2.4.1 - Etapa 1 – Definición de los objetivos y alcance del ACV	25
2.4.2 – Etapa 2 – Análisis del inventario	26
2.4.2.1 - Recogida, valoración, aceptación y estructuración de los datos	27
2.4.3 - Etapa 3 – Evaluación del impacto	29
2.4.3.1 - Selección y definición de las categorías de impactos, indicadores de la categoría y modelos de estimación	30
2.4.3.2 - Asignación de los resultados del análisis del inventario	36
2.4.3.3 - Calculo de los indicadores de categoría	37
2.4.3.4 - Elementos opcionales e informaciones	38
2.4.5 - Interpretación de los resultados.....	38

2.4.6 - Aspectos evolutivos del ACV	39
2.4.7 - Soporte informático aplicado al ACV	40
2.5 - ACV de los materiales de construcción.....	43
2.5.1 – Consideraciones generales	43
2.5.2 - El perfil medioambiental de materiales y productos derivados del cemento	45
2.5.3 - El perfil medioambiental del cemento	48

CAPÍTULO 3 - ANÁLISIS DE LOS INVENTARIOS - DATOS DE ENTRADAS Y SALIDAS

3.1 – Antecedentes.....	51
3.2 - Objetivos	52
3.3 – Estructuración de los inventarios del sistema de producción del cemento	53
3.4 - Análisis de los datos de entrada	56
3.4.1 - Estructura de los datos de entrada	56
3.4.2 - Los datos de entrada	56
3.4.2.1 - El consumo de materias primas	56
3.4.2.2 - El consumo de energía	58
3.5 – Análisis de los datos de salida	60
3.5.1 - Los factores estudiados	60
3.5.2 - Emisiones de CO ₂	62
3.5.2.1 - Los resultados de los inventarios	63
3.5.2.2 - Los resultados de la estimación numérico	65
3.5.2.3 - Comparación de resultados	67
3.5.3 - Emisiones de NO _x	68
3.5.3.1 - Los resultados de los inventarios	69
3.5.3.2 - Los resultados de la estimación numérica	69
3.5.3.3 - Comparación de resultados	71
3.5.4 - Emisiones de SO ₂	73
3.5.4.1 - Los resultados de los inventarios	73
3.5.4.2 - Los resultados de la estimación numérica	74
3.5.4.3 - Comparación de resultados	76
3.5.5 - Emisiones de polvo	77
3.5.5.1 - Los resultados de los inventarios	77
3.5.5.2 - Los resultados de la estimación numérica	77
3.5.5.3 - Comparación de resultados	78
3.5.6 - Otras emisiones	80
3.6 - Conclusiones	80

CAPÍTULO 4 – ANÁLISIS DEL IMPACTO

4.1 - Introducción	83
4.2 - Impactos medioambientales analizados	84
4.3 - Ámbito global	84
4.3.1 - Efecto Invernadero	84
4.4 - Ámbito regional	86
4.4.1 – Acidificación	87
4.4.2 – Eutrofización	89
4.5 - Ámbito local	89
4.6 - Otros impactos caracterizados a partir de emisiones menores	92
4.6.1 - Formación fotoquímica de ozono	93
4.6.2 - Metales pesados y carcinógenos	93
4.7 - Conclusiones	95

CAPÍTULO 5 - BASES PARA UN MODELO NACIONAL DE INVENTARIOS DE CEMENTO

5.1 – Objeto	97
5.2 – Consideraciones sobre la creación de un modelo nacional	98
5.2.1 – Consideraciones generales del sector	98
5.2.2 – Características técnicas	101
5.2.3 – Situación en otros inventarios	102
5.3 – Estructuración general del proceso constructivo	103
5.3.1 – El ciclo de vida del proceso constructivo	103
5.3.2 - Los límites del sistema	106
5.3.3 - Las entradas del sistema	108
5.3.4 - Los procesos del sistema	111
5.3.5 - Las salidas del sistema	112
5.4 - Propuesta de estructuración del modelo	115
5.4.1 - Los límites del sistema	115
5.4.2 - Estructuración en subsistemas	115
5.4.3 - Número de subsistemas a utilizar en los estudios nacionales	120
5.4.4 – Valores representativos a utilizar en los estudios nacionales	121
5.4.5 – Punto de vista del análisis	122
5.4.6 – Otras consideraciones	125
5.5 – Conclusiones	126

CAPÍTULO 6 – APLICACIÓN DEL ACV EN LA ELABORACIÓN DEL INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA DE LA FABRICACIÓN DEL CEMENTO

6.1 - Antecedentes	129
6.2 – Objetivos	129
6.3 – Ámbito del sistema analizado	130
6.4 - Análisis del inventario (ICV)	131
6.4.1 – Introducción	131
6.4.2 – Datos de entrada	132
6.4.2.1 – Recursos materiales	132
6.4.2.2 – Recursos energéticos	134
6.4.3 – Datos de salida	139
6.4.3.1 – Emisiones	139
6.4.3.2 – Residuos	152
6.4.4 – Análisis de los resultados	152
6.4.4.1 – Consumos energéticos	152
6.4.4.2 – Emisiones al medio ambiente	157
6.5 – Interpretación de los resultados	159
6.5.1 – Introducción	159
6.5.2 – Estudio comparativo	161
6.5.2.1 – Consumos energéticos	162
6.5.2.2 – Emisiones al medio ambiente	165
6.6 – Conclusiones	169

CAPÍTULO 7 – CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

7.1 – Introducción	173
7.2 – Conclusiones generales	173
7.3 – Conclusiones específicas	175
7.3.1 – Relativas al estudio de los inventarios del ciclo de vida del cemento, disponibles para realizar el ACV de sus derivados	175
7.3.2 - Relativas a caracterización de los impactos medioambientales de la producción de cemento, realizadas con los inventarios disponibles	175
7.3.3 - Relativas a la producción del modelo nacional de inventarios de la producción de cemento.....	177
7.3.4 – Relativas a la campaña para elaboración del inventario del ciclo de vida de la producción de cemento	178
7.4 – Líneas futuras de investigaciones y desarrollo	180

7.4.1 – Estudios relativos a los inventarios del ciclo de vida de la producción de cemento	180
7.4.2 – La sistematización informática para realizar estos inventarios	181
7.4.3 – Estudios relacionados con el ACV de los productos derivados del cemento	181
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	183

RELACION DE ANEJOS

ANEJO 1

GLOSARIO	193
----------------	-----

ANEJO 2

INVENTARIOS DE LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO	199
A2.1 - Cement Portland I	201
A2.2 - Cement CH	205
A2.3 - Cement N	209
A2.4 - Portlandcement NL1	213
A2.5 - Cement S	217
A2.6 - Cement SF1	221
A2.7 - Cement SF2	225
A2.8 - Cement Portland	229
A2.9 - Portlandcement A	233
A2.10 - Portlandcement NL2	237
A2.11 - Portlandcement NL3	241
A2.12 - Cement Hoogoven I	245
A2.13 - Blastfurnace slag cement	249
A2.14 - Blastfurnace slag cement NL1	253
A2.15 - Blastfurnace slag cement NL2	257
A2.16 - Portlandashcement	261

ANEJO 3

MODELOS PARA INVENTARIAR LAS EMISIONES DE CO ₂ , NO _x Y SO ₂ , CON ORIGEN EN LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO Y DE FUENTES ENERGÉTICAS	265
A3.1 – Diagrama de flujo para el inventario de las emisiones de CO ₂ originado en la producción del cemento, basado en la metodología del IPCC. Fuente de emisión: descarbonatación de la materia prima en la producción del clinker	267
A3.2 – Diagrama de flujo para el inventario de las emisiones de CO ₂ originado en la producción de cemento, basado en la metodología del IPCC. Fuente de emisión: quema de combustibles fósiles en el horno de clinker	268
A3.3 – Diagrama de flujo para el inventario de las emisiones de CO ₂ originado en la producción de cemento, basado en la metodología del IPCC. Fuente de emisión: matriz energética para la producción de electricidad suministrada a la planta cementera	269
A3.4 – Diagrama de flujo para el inventario de las emisiones de NO _x originado en la producción de cemento, basado en la metodología del IPCC. Fuente de emisión: quema de combustibles fósiles en el horno de producción del clinker	270
A3.5 – Diagrama de flujo para el inventario de las emisiones de NO _x originado en la producción de cemento, basado en la metodología del IPCC. Fuente de emisión: matriz energética para la producción de electricidad suministrada a la planta cementera	271
A3.6 – Diagrama de flujo para el inventario de las emisiones de SO ₂ originado en la producción de cemento, basado en la metodología del IPCC. Fuente de emisión: calcinación de la materia prima en el horno de clinker	272
A3.7 – Diagrama de flujo para el inventario de las emisiones de SO ₂ originado en la producción de cemento, basado en la metodología del IPCC. Fuente de emisión : quema de combustibles fósiles en el horno de producción del clinker	273
A3.8 – Diagrama de flujo para el inventario de las emisiones de SO ₂ originado en la producción de cemento, basado en la metodología del IPCC. Fuente de emisión: matriz energética para la producción de electricidad suministrada a la planta cementera	274

ANEJO 4

DIAGRAMAS DEL PROCESO	275
A4.1 – Fase 1 – Subsistema CANTERA -Extracción, trituración y Prehomogenización de la materia prima – Caliza	277
A4.2 – Fase 1 – Subsistema CANTERA -Extracción, trituración y Prehomogenización de la materia prima – Arcilla	279
A4.3 – Fase 1 – Subsistema CANTERA -Extracción, trituración y Prehomogenización de la materia prima – Arenisco	280
A4.4 – Fase 1 – Subsistema CANTERA - Extracción, trituración y Prehomogenización de la materia prima – Corrector de Hierro	281
A4.5 – Fase 2.1 – Subsistema COMBUSTIBLE DEL HORNO - Preparación del carbón	282
A4.6 – Fase 2.1 – Subsistema PREPARACIÓN DEL CRUDO - Molienda del crudo	283
A4.7 – Fase 3 – Subsistema PRODUCCIÓN DEL CLINKER - Cocción del crudo	284
A4.8 – Fase 4 – Subsistema PRODUCCIÓN DE CEMENTO - Fabricación del cemento	285
A4.9 – Fase 5 – Subsistema DISTRIBUCIÓN - Expedición del cemento	286
A4.10 - Memoria de cálculos	287
A4.11 – Emisiones medidas en cinco controles puntales	295
A4.12 – Indicadores de categoría de impactos oriundas de las fuentes energéticas	296

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 – Nuevo paradigma hacia una construcción sostenible	9
Figura 2.2 – Flujo genérico del ciclo de vida de un producto	10
Figura 2.3 – Ejemplo de atribución de responsabilidad por etapa del ciclo de vida.....	11
Figura 2.4 – Ciclo de vida del proceso constructivo	12
Figura 2.5 – Diferentes niveles para aplicar el estudio del ciclo de vida del producto de la construcción	13
Figura 2.6 – Concepto del ciclo de vida del producto de la construcción.....	17
Figura 2.7 – Marco del análisis del ciclo de vida, según la ISO 14:040:1997	24
Figura 2.8 – Flujo metodológico del ACV	24
Figura 2.9 – Flujo con lista de chequeo de la 1ª etapa del ACV.....	25
Figura 2.10 – Flujo con lista de chequeo de la 2ª etapa del ACV	28
Figura 2.11 – Elementos que componen la valoración del impacto del ACV	30
Figura 2.12 – Mecanismo del calentamiento global.....	32
Figura 2.13 – Mecanismo de la acidificación con efecto a través de la lluvia ácida	33
Figura 2.14 – Flujo con lista de chequeo de la 4ª etapa del ACV.....	39
Figura 2.15 – Ciclo de vida de un prefabricado de hormigón.....	46
Figura 2.16 – Participación de la producción del cemento en el ciclo de vida de un prefabricado de hormigón.....	47

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 – Evolución del consumo medio de energía para la producción del clinker.....	59
Figura 3.2 – Principales fuentes de emisión de CO ₂ , con respecto al consumo de energías en la producción de cemento.....	64
Figura 3.3 – Comparación entre las emisiones totales de CO ₂ obtenidas según el modelo y las registradas en los inventarios para cada tipo de cemento.....	67
Figura 3.4 – Porcentajes de emisión de CO ₂ correspondiente a las fases principales estudiadas	68
Figura 3.5 – Comparación entre las emisiones de NO _x obtenidas según el modelo y las registradas en los inventarios para cada tipo de cemento	72
Figura 3.6 – Comparación entre las emisiones de SO ₂ obtenidas según el modelo y las registradas en los inventarios para cada tipo de cemento	76
Figura 3.7 – Comparación entre las emisiones de Polvo obtenidas según el modelo y las registradas en los inventarios para cada tipo de cemento	79

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 – Estructuración lineal del ciclo de vida del producto de la construcción	107
Figura 5.2 – Célula base de un proceso fundamental	107
Figura 5.3 – Visualización de un transporte (servicio) como un proceso	113
Figura 5.4 – Visualización de un operario como producto resultante de un proceso.....	114
Figura 5.5 – Estructuración en subsistema (1)	116
Figura 5.6 – Estructuración en subsistema (2).....	119
Figura 5.7 – Desglose de los subsistemas dados por Viñals	120
Figura 5.8 – Visualización de los efectos a diferentes niveles en función de donde se originan	123

LISTA DE GRÁFICOS**CAPÍTULO 6**

Gráfico 6.1 – Consumo de gasóleo y electricidad.....	138
Gráfico 6.2 – Consumo de gasóleo, electricidad y combustible del horno (hulla+coque).....	138
Gráfico 6.3 – Consumo del horno de clinker de energía fósil y eléctrica	139
Gráfico 6.4 – Emisiones de CO ₂ /t cemento debidas al consumo eléctrico y de gasóleo de cada fase	145
Gráfico 6.5 – Emisiones de NO _x /t cemento debidas al consumo eléctrico y de gasóleo de cada fase	145
Gráfico 6.6 – Emisiones de SO ₂ /t cemento debidas al consumo eléctrico y de gasóleo de cada fase	146
Gráfico 6.7 – Emisiones de C _x H _y y VOC /t cemento debidas al consumo eléctrico y de gasóleo de cada fase	146
Gráfico 6.8 – Emisiones de polvo y hollín /t cemento debidas al consumo eléctrico y de gasóleo de cada fase	147
Gráfico 6.9 – Emisiones de metales pesados /t cemento debidas al consumo eléctrico y de gasóleo de cada fase	147
Gráfico 6.10 – Emisiones de cadmio /t cemento debidas al consumo eléctrico y de gasóleo de cada fase	148
Gráfico 6.11 – Emisiones de plomo /t cemento debidas al consumo eléctrico y de gasóleo de cada fase	149
Gráfico 6.12 – Consumo de energía según la fase	154
Gráfico 6.13 – Consumo de energía, en porcentaje, por fuentes	154
Gráfico 6.14 – Fuentes origen de las emisiones	158
Gráfico 6.15 – Emisiones de CO ₂ de cada fase del proceso de fabricación.....	158

Gráfico 6.16 – Fuentes origen de las emisiones de CO ₂	159
Gráfico 6.17 – Consumos energéticos en la fabricación de 1 tonelada de cemento.....	164

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO 2

Tabla 2.1 – Datos típicos del sector de la construcción relacionados con el medio ambiente	8
Tabla 2.2 – Impactos potenciales al medio ambiente del producto de la construcción	14
Tabla 2.3 – Herramientas conceptualmente similares usadas en los sistemas de gestión ambiental	18
Tabla 2.4 – Aspectos generales de las herramientas para la gestión ambiental	23
Tabla 2.5 – Categorías de impactos consideradas más relevantes	31
Tabla 2.6 – Ejemplo de indicadores de categoría resultante	36
Tabla 2.7 – Programas de ordenadores para el ACV de productos genéricos	42
Tabla 2.8 – Programas de ordenadores que auxilian el ACV de productos de la construcción	43
Tabla 2.9 – Criterios aplicables para definir el material medioambientalmente correcto	44
Tabla 2.10 – Materiales de construcción donde se aplicaron el ACV	44

CAPÍTULO 3

Tabla 3.1 – Inventarios de los cementos (SimaPro y Cembureau) utilizados	54
Tabla 3.2 – Producción de cemento en la Unión Europea	55
Tabla 3.3 – Consumo de materias primas en la producción de 1 kg de cemento	57
Tabla 3.4 – Consumo de energías (en MJ) en la producción d 1 kg de cemento	58
Tabla 3.5 – Consumo medio energético de materiales usados en la construcción	60
Tabla 3.6 – Principales sustancias emitidas (en gramos) al aire en la fabricación de 1 kg de cemento.....	62
Tabla 3.7 – Emisiones al aire típicas de cada matriz energética de los inventarios	62
Tabla 3.8 – Emisiones de CO ₂ (en gramos) según el modelo teórico del IPCC, desglosado por tipo de combustible, en la fabricación de 1 kg de cemento	66
Tabla 3.9 – Emisiones de CO ₂ (en gramos) de cada una de las etapas, y de las registradas en el inventario	66
Tabla 3.10 – Emisiones de NO _x (en gramos) según el modelo teórico del IPCC, desglosado por tipo de combustible, en la fabricación de 1 kg de cemento	70
Tabla 3.11 – Emisiones de NO _x (en gramos) de cada etapa, según el modelo del IPCC, y los totales dados en el inventario correspondiente a cada cemento.....	71
Tabla 3.12 – Emisiones de SO ₂ (en miligramo) de cada etapa, según el modelo del IPCC, y los totales dadas en el inventario correspondiente a cada cemento	74

Tabla 3.13 – Emisiones de Polvo (en gramos) típica de la quema de combustibles fósiles en la producción de energía térmica.....	78
Tabla 3.14 – Emisión de Polvo (en gramos) al aire en la fabricación de 1 kg de cemento.....	79

CAPÍTULO 4

Tabla 4.1 – Categorías de impacto consideradas inicialmente para el estudio	84
Tabla 4.2 – Caracterización de los distintos cementos con respecto al impacto global “efecto invernadero” (en gramos de CO ₂ equivalente).....	85
Tabla 4.3 – Factores de caracterización utilizados en la acidificación y en la eutrofización.....	87
Tabla 4.4 – Caracterización de los distintos cementos con respecto al impacto regional “acidificación” (en gramos de SO ₂ equivalente).....	88
Tabla 4.5 – Caracterización de los distintos cementos con respecto al impacto regional “Eutrofización” (en miligramos de PO ₄ equivalente).....	90
Tabla 4.6 – Caracterización de los distintos cementos, con respecto al impacto local “contaminación de invierno”, (en gramos de SPM equivalentes)	91
Tabla 4.7 – Factores de caracterización para otras emisiones incidentes en las categorías de impacto: Carcinógenos, Formación fotoquímica de ozono, y Metales pesados	92
Tabla 4.8 – Caracterización de los distintos cementos con respecto a otras categorías de impactos medioambientales consideradas.....	94

CAPÍTULO 5

Tabla 5.1 – Porcentaje de producción de cemento respecto al total, según países o continentes	98
Tabla 5.2 – Datos relativos a la fabricación de cemento en diversos países	99
Tabla 5.3 – Entradas al sistema según CEMBUREAU y VDZ	104
Tabla 5.4 – Tabla de emisiones según diferentes fuentes.....	105
Tabla 5.3 – Matriz energética en España y en ámbito mundial (años 1996 y 2020)	122

CAPÍTULO 6

Tabla 6.1 – Composición de los diferentes tipos de cemento según la Norma UNE 80 01:96/RC-97	132
Tabla 6.2 – Consumo de materias primas.....	132
Tabla 6.3 – Consumo de recursos auxiliares.....	133
Tabla 6.4 – Márgenes de composición del crudo	133
Tabla 6.5 – Consumo de materias primas por tonelada de cemento	134
Tabla 6.6 – Consumo de recursos auxiliares por tonelada de cemento	134
Tabla 6.7 – Rendimiento de producción de las canteras.....	135

Tabla 6.8 – Consumo de gasóleo por maquinaria de la cantera	135
Tabla 6.9 – Consumo de energía eléctrica y producción por fases.....	135
Tabla 6.10 – Consumo térmico del quemador del horno	136
Tabla 6.11 – Características del combustible del quemador del horno	136
Tabla 6.12 – Consumo de gasóleo por tonelada de cemento.....	137
Tabla 6.13 – Consumo de energía eléctrica por fase de la producción de cemento	137
Tabla 6.14 – Consumo de energía térmica en el horno de clinker	138
Tabla 6.15 – Emisiones de los principales contaminantes, durante la fabricación y consumo de 1 MJ de energía eléctrica en España e importancia (en % respecto al resto de emisiones) de su impacto ambiental.....	141
Tabla 6.16 – Emisiones de los principales contaminantes, durante la producción y consumo de 1 kg de gasóleo e importancia (en % respecto al resto de emisiones) de su Impacto ambiental	142
Tabla 6.17.1 – Emisiones en las diferentes fases de fabricación del cemento	143
Tabla 6.17.2 – Emisiones en las diferentes fases de fabricación del cemento	144
Tabla 6.18 – Emisiones debidas a las reacciones químicas dentro del horno	151
Tabla 6.19 – Residuos sólidos generados en la fabricación de 1 t de cemento.....	152
Tabla 6.20 – Consumo total de energía eléctrica de la maquinaria empleada, en MJ/t de cemento	152
Tabla 6.21 – Consumo total de energía fósil de la maquinaria de las canteras y de los camiones que hacen el transporte, en l gasóleo /t cemento y en MJ/t cemento	153
Tabla 6.22 – Consumo total de energía del quemador del horno, en MJ/t cemento	153
Tabla 6.23 – Consumo total de energía, en MJ/t cemento	153
Tabla 6.24 – Comparación de consumo de electricidad teórico vs real.....	155
Tabla 6.25 – Comparación de consumo de electricidad teórico vs real, corregido.....	156
Tabla 6.26 – Emisiones totales y según las fuentes, por tonelada de cemento.....	157
Tabla 6.27 – Cementos seleccionados para los estudios comparativo	161
Tabla 6.28 – Consumo energético en la fabricación de 1 tonelada de cemento.....	162
Tabla 6.29 – Principales emisiones durante la fabricación de 1 tonelada de cemento	165
Tabla 6.30 – Valores medios de las emisiones de los hornos de cemento europeo	167

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 - ANTECEDENTES

El deterioro que viene sufriendo el medio ambiente afecta seriamente a la naturaleza, en la que se aprecia elevados niveles de: consumo de recursos naturales (incluyendo las tierras fértiles), contaminación de la atmósfera y el agotamiento y/o contaminación de los recursos hidrológicos, todo ello es fruto, principalmente, de la intensa actividad humana. Sus consecuencias, además de alterar el ecosistema, resultan en muchos casos perjudiciales para la salud humana o representan importantes pérdidas de la calidad de vida en algunas zonas; lo que ha provocado una gran inquietud entre sectores representativos de nuestra sociedad.

Ante estas condiciones, los temas relacionados con la preservación del medio ambiente empiezan a movilizar importantes sectores sociales, tanto del ámbito gubernamental como de la propia sociedad civil. Las preocupaciones marcadas en otras épocas respecto al futuro, así como los discursos con posiciones meramente ideológicas, se han visto sustituidas por acciones que efectivamente buscan frenar parte de estos efectos negativos, causados por las actividades del hombre.

Esta nueva forma de actuar hacia un futuro, que se basa en los principios del desarrollo sostenible, está asumiendo también un carácter estratégico en ciertos sectores productivos, ayudándoles a conquistar nuevos mercados de una economía cada día más globalizada.

El sector de la construcción es responsable de grandes aportaciones económicas y sociales (representa en el entorno del 10% del Producto Interior Bruto de los países occidentales) a través de la producción de bienes y servicios. Este mismo sector empieza a reconocer la necesidad de sumar esfuerzos para producir sus productos de forma medioambientalmente correcta.

Históricamente, el sector de la construcción requiere un consumo elevado de materiales y energía, lo que consecuentemente, genera grandes cantidades de emisiones gaseosas, líquidas o sólidas contaminantes al medio ambiente. Así pues, para evaluar medioambientalmente al sector se requiere: reconocer, cuantificar y calificar tanto los recursos utilizados como las emisiones generadas en las diferentes etapas del proceso constructivo.

Por lo que respecta a esta problemática, y fundamentándose conceptualmente en el ciclo de vida completo del producto, existen diversas metodologías científicas que permiten apoyar la gestión medioambiental de estos productos, procesos o servicios. Entre estas metodologías está el **análisis del ciclo de vida (ACV)**, el cual ha demostrado una capacidad adecuada para valorar y evaluar los impactos potenciales al medio ambiente ocurridos durante el ciclo de vida completo de un producto o proceso, además se presenta como una herramienta efectiva y de apoyo a la gestión de los aspectos medioambientales.

Por otro lado, el ciclo de vida completo de los productos de la construcción es de una gran complejidad. Ello responde a las numerosas facetas espaciales y temporales que intervienen, así como a la propia estructura del sector (numerosos agentes que intervienen, etc.) lo que hace que resulte difícil elaborar un análisis completo del producto desde el punto de vista medioambiental, y justifica que ciertos estudios se concentren en determinadas fases de su ciclo de vida o que estén relacionados sólo con el ciclo de vida de algunos materiales o servicios usados en la construcción.

En el caso de los productos derivados del cemento, a causa de su masivo empleo en la construcción de edificios u obras civiles, intervienen numerosas variables en lo referente a su aspecto medioambiental, lo que implica una valoración sistemática y una evaluación de éste perfil a largo de todo su ciclo de vida. Estos resultados fiables, representativos y reproducibles constituirán la **memoria medioambiental** del producto y, consecuentemente, debe ser agregada a las características medioambientales del componente o del elemento que lo utilice, permitiendo profundizar el conocimiento de sus propiedades, bien como uno de sus constituyentes o como uno de sus procesos de fabricación en cada fase de su ciclo de vida.

En los productos derivados del cemento, por ejemplo el hormigón, el contenido y tipo de cemento, así como el origen del mismo tienen una influencia significativa en su perfil medioambiental, de modo, que a la hora de clasificar estas variables será necesario agregarlas a

su memoria medioambiental. A su vez, el cemento deberá dar respuestas sobre cualquier cuestión medioambiental ocurrida a lo largo de su ciclo de vida.

Dentro del sector de la construcción, aparte del retraso en esta dirección, no existen procedimientos universalmente aceptados, en contraposición con lo que sucede con algunos productos de la industria de producción en serie. En la actualidad existen distintas tendencias para valorar medioambientalmente los materiales del sector de la construcción, sobre los que se aplican variables específicas como el origen de diferentes zonas geográficas o los aspectos tecnológicos temporales.

Todo ello justifica tanto la necesidad de profundizar en el conocimiento de todos los aspectos medioambientales que afecten al ciclo de vida de los productos de la construcción, y para el caso de la presente tesis, de los productos fabricados en base al cemento, como el rigor por examinar los límites del sistema a la hora de elaborar los inventarios del ciclo de vida del proceso de producción del cemento.

1.2 – OBJETIVO

El presente trabajo se orienta fundamentalmente hacia el estudio de los aspectos medioambientales de la producción del cemento, y las otras etapas que componen su ciclo de vida, para luego utilizarlo como fundamento metodológico para el desarrollo de un inventario nacional en la producción del cemento o de cualquier.

Por lo tanto, se propone como objetivo principal de esta tesis, por un lado, desarrollar el análisis del ciclo de vida de la producción del cemento, utilizando los inventarios disponibles en el ámbito internacional, para identificar, clasificar y caracterizar los aspectos medioambientales más relevantes con sus respectivos impactos potenciales en el medio ambiente, y, por otro lado, sentar las bases conceptuales y metodológicas para el desarrollo de un inventario nacional del cemento y los productos derivados del mismo.

Para alcanzar los objetivos planteados en este estudio se han marcado unos objetivos básicos, los cuales se exponen seguidamente:

- Realizar un exhaustivo estudio sobre las bases de datos (inventarios existentes del ciclo de vida) referentes a los cementos, y públicamente disponibles en el ámbito internacional, de cara a averiguar los límites aplicados de los diferentes sistemas y su viabilidad para su utilización en el ACV de los productos realizados en base cemento.

- Elaborar la estructura de un modelo de inventario de ciclo de vida del cemento que tenga validez en España o en cualquier otro país con la misma técnica productiva. Esta estructura se ha puesto a punto en el estudio detallado de un cemento nacional.
- Plantear y desarrollar las bases conceptuales para incorporar en el ACV factores no contemplados hasta la fecha, que permitirían un tratamiento integrado de las diferentes prestaciones requeridas a un producto. Este planteamiento permite, al mismo tiempo, realizar estudios por etapas (de la cuna hasta la puerta o de la cuna hasta la tumba) y niveles de análisis (en función de quien realiza el análisis)

1.3 - METODOLOGÍA

Para conseguir los objetivos propuestos se han desarrollado distintos trabajos, los cuales dan contenido a los diferentes capítulos de esta tesis. A continuación se describe brevemente la metodología seguida en cada uno de ellos.

En el capítulo 2, y fruto de una intensa revisión bibliográfica, se da a conocer un panorama general de los aspectos más relevantes relacionados con el análisis del ciclo de vida de los productos, elementos, componentes y materiales del sector de la construcción. Este estudio pone de manifiesto, entre otros aspectos, la necesidad actual de investigar a distintos niveles, ya sea a nivel de los materiales o bien a nivel del producto, recordando que en este sector, generalmente se tratan de productos únicos y complejos. En este mismo capítulo, se presenta también el estado del conocimiento de la metodología del análisis del ciclo de vida, seguido de un glosario, con los principales términos usualmente empleados en el método, el cual se incluye en el anejo 1.

Tras el estado del conocimiento en el capítulo 3 se presenta el estudio comparativo entre los datos de entradas y salidas utilizados en los distintos inventarios del ciclo de vida de la producción de cemento, internacionalmente disponibles, y los puntos de vista determinantes a la hora de valorar sus aspectos medioambientales. En el anejo 2 se presentan las fichas de los cementos utilizados de los inventarios internacionales que se han dispuesto (CEMBUREAU y SIMAPRO). En estas fichas se ha aportado una estructuración que permite ver los dos subsistemas principales: producción del clinker y producción del cemento.

En este sentido, las variables principales adoptadas en este estudio son el tipo y origen geográfico del cemento, los límites del sistema considerados, la consistencia y calidad de los datos, así como su representatividad. En cuanto a parámetros de referencia del estudio se han adoptado, para cada tipo de cemento estudiado, el consumo de materias primas y energías (eléctrica y térmica), y las emisiones al aire de CO₂ (dióxido de carbono), SO₂ (dióxido de azufre), NO_x (óxidos de nitrógenos) y partículas sólidas al aire (Polvo)

Tomando como punto de partida los resultados obtenidos en el estudio de los inventarios disponibles, en el capítulo 4 se presentan con base a los modelos de valoración adoptado para el análisis del ciclo de vida, los impactos potenciales originados por todos los aspectos medioambientales considerados de la producción de cemento. El procedimiento se basa en caracterizar los diferentes impactos potenciales al medio ambiente a través de los mecanismos medioambientales que desencadenan las distintas emisiones al aire considerando tres ámbitos de actuación: global, regional y local. Asociado a este capítulo, en el anejo 3 se presentan diferentes diagramas de flujo alternativos (en base a otras fuentes) que se han utilizado para contrastar las diferentes emisiones que aportaban los inventarios disponibles. Ello significa, por otra parte, una posibilidad alternativa, en ciertos casos, de calcular las emisiones.

En el capítulo 5, en primer lugar se hace una significativa aportación conceptual para integrar el ACV con otras herramientas metodológicas de las restantes prestaciones de una obra. Esta aportación, que incorpora el concepto de **memoria ambiental (MA)**, permite analizar el ACV desde distintos puntos de análisis (global, regional y local). Asimismo, permite incorporar los efectos medioambientales de los operarios directos que intervienen en los procesos de producción. Con todo ello, se articula un modelo de inventario nacional de la producción de cemento, articulado en diferentes subsistemas considerando como límites en cada uno de ellos “desde la cuna hasta la puerta”.

Posteriormente, en el capítulo 6 se presentan los datos reales inventariados del sistema de producción de una planta cementera en Cataluña, donde se consideran las distintas variables de la producción, así como el comportamiento de sus subsistemas con respecto a los consumos de materias primas, energías y emisiones al aire que potencialmente generan impactos al medio ambiente. En este estudio se han analizado, entre otras, la influencia de la tecnología de producción, la secuencia de los subsistemas a lo largo del ciclo de vida considerado y sus respectivos comportamientos. Asimismo, en este capítulo se expone un análisis comparativo entre los resultados obtenidos con respecto a los aportados en los inventarios utilizados (CEMBUREAU y SimaPro). Los flujos de los diferentes subsistemas, así como los cálculos realizados en cada uno de ellos se presentan en el anejo 4.

En el capítulo 7, último de esta tesis, se presentan en primer lugar las conclusiones derivadas de los distintos trabajos realizados. Estas se exponen en forma de unas conclusiones generales que responden a los objetivos principales propuestos y, también, de unas conclusiones específicas que obedecen a diferentes resultados concretos de los trabajos desarrollados. Seguidamente, se presentan diferentes líneas de investigación futuras surgidas como consecuencia de los trabajos desarrollados en la presente tesis doctoral.

Por último, se incluye un apartado con las referencias bibliográficas, referidas en la plasmación del presente trabajo, lo que evidentemente es menos que el número total de referencias utilizadas.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1 – INTRODUCCIÓN

El **análisis del ciclo de vida (ACV)** se considera un método fiable para evaluar las interrelaciones entre los sistemas de producción, productos o servicios y el medio ambiente. El ACV cuantifica, cualifica y valora los flujos de un sistema - entradas (materia y energía) y salidas (producto, coproductos, emisiones al aire, agua y suelo) - para posteriormente evaluar los impactos potenciales que éstos causan al medio ambiente. Sus resultados, entre otras funciones, sirven como apoyo al desarrollo de productos considerados medioambientalmente correctos.

El objetivo de este capítulo, es hacer una síntesis crítica del estado del conocimiento sobre el análisis del ciclo de vida - ACV- y su aplicación en el sector de la construcción. En esta síntesis se analiza, en primer lugar, los aspectos más relevantes de esta metodología en lo referente a los aspectos conceptuales, así como los avances técnicos ocurridos en los últimos años. Todo ello, contribuye a considerar al ACV como una herramienta de apoyo en la toma de decisiones sobre temas medioambientales de sistemas, productos o procesos.

Además, se hace hincapié en el enfoque especial que debe darse de su aplicación en los materiales de construcción derivados del cemento, por lo que se recalcan los inventarios del ciclo de vida de los sistemas de producción del cemento debido a su importante incidencia sobre el perfil medioambiental de estos productos, y que enmarcan los estudios que se llevan a cabo en esta tesis.

2.2 – LA CONSTRUCCIÓN Y EL MEDIO AMBIENTE

El sector de la construcción civil se encuadra entre los sectores productivos que a lo largo de toda su historia han disfrutado de una reconocida importancia económica y social. Como cualquier actividad humana, en este caso acentuado por su implicación con el entorno, ello provoca impactos significativos para el medio ambiente tanto a la hora de producir, como de usar o deshacerse de sus productos. [Over Arup & Partners, 1993; Anink, D. et al., 1996; Aguado, A. et al., 1997; Fábregas, J. et al., 1998; U.S.A.-DOE, 1998; Symonds Group, 1999; ITeC, 2000]

En las distintas etapas del ciclo de vida de estos productos, los impactos medioambientales se producen de diferentes formas, y dan lugar a efectos contaminantes sobre el entorno ambiental, que directamente pueden afectar a la salud humana. En la tabla 2.1 se apuntan algunos datos del sector que pueden ocasionar estos efectos indeseables.

- El sector de la construcción moviliza el 10% de toda la economía mundial y consume cada año un 40% de la energía producida en todo el mundo. [Lippiatt, 1998]
- Anualmente, el 24% del gas natural y el 35% de la electricidad consumida en Estados Unidos se usa para iluminar, acondicionar ambientalmente y poner en funcionamiento los edificios. Como consecuencia de estos consumos, se emite cerca de 1,3 millones de toneladas anuales de gases de efecto invernadero, lo que representa 31% de toda la contribución de aquél país para el calentamiento global. [Blanchard et al., 1998]
- Estudios efectuados en Reino Unido, Francia y España [ITeC, 2000], revelan que el consumo energético asociado a la construcción se distribuye de la siguiente manera:
 - 19% para la construcción y mantenimiento de los edificios;
 - 48 % para el consumo directo por uso (electricidad, gas, etc.);
 - y 33% para el transporte.
- La cantidad de residuos de la construcción y demolición (RCD) generados en el conjunto de los países de la Unión Europea, supera los 180 millones de toneladas al año, hecho que representa 480 kg. por persona al año. De aquí solamente el 28% de estos residuos son reusados o reciclados, el restante (72%) se envía a vertederos.[Symonds, 1999]

Tabla 2.1 – Datos típicos del sector de la construcción relacionados con el medio ambiente

Los edificios u obras de infraestructura que se construyen, además de necesarios porque aportan calidad de vida, en la mayoría de los casos, son imprescindibles para la propia supervivencia del hombre. En muchos casos estos edificios u obras de infraestructuras son símbolos de logros sociales y económicos en nuestra sociedad, aunque siempre originan impactos medioambientales, con frecuencia admitidos como inherentes de la actividad constructiva, pero que en otras ocasiones, acusan una fuerte oposición (p.ej.: algunos embalses).

En los últimos años, el aumento significativo de la conciencia por la protección del medio ambiente, ha puesto de manifiesto la necesidad de que todos los sectores productivos, incluyendo el constructivo, concentren esfuerzos en controlar y reducir sus participaciones en las acciones que contribuyan a dañar al medio ambiente, dado la limitada capacidad soporte de nuestro planeta.

Esta nueva forma de producir, sin frenar el desarrollo y sin comprometer la sostenibilidad, necesita incorporarse por todo el colectivo afectado (sector productivo, usuario final y administración pública), para en conjunto dar respuestas satisfactorias en la forma de actitudes más respetuosas con el entorno ambiental y que el resultado de ese esfuerzo se transforme en valores culturales para conducir a todos hacia una convivencia comprometida con un futuro sostenible. [Mebratu, 1998]

Augenbroe [1998], por ejemplo, sugiere que el sector de la construcción empiece a modificar su forma trabajo, que dé lugar a un nuevo paradigma contemplando la *satisfacción del usuario*, el *menor consumo de material/energía* y el *menor impacto medioambiental*, como refleja la figura 2.1. Lo que parece ser el inicio en la búsqueda de solución para la dicotomía entre producción y consumo sostenible.

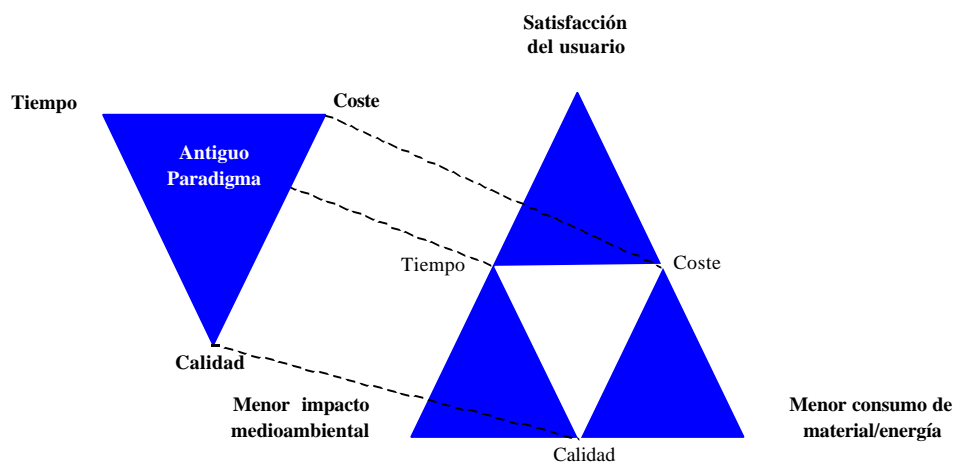


Figura 2.1 – Nuevo paradigma hacia una construcción sostenible. [Augenbroe, 1998]

2.2.1 - El ciclo de vida del producto de la construcción

Una manera de visualizar todas las interrelaciones que pueden ocurrir a lo largo de todo el ciclo de vida es mediante la estructuración de un sistema o proceso, de tal modo que queden representados todos los pasos constituyentes de este sistema, es decir, desde el punto considerado “inicio” hasta donde “finaliza” su función. Este procedimiento constituye una práctica recomendable para realizar estudios de sistemas, donde se precisa una visión holística del comportamiento integral del sistema, principalmente con objeto de gestionar aspectos técnicos, económicos o medioambientales. Esta práctica facilita la interpretación de todos los aspectos en el ámbito global del sistema, incluyendo tanto los retrospectivos como los prospectivos.

En general, estos estudios se concentran en los flujos de entradas (material, energías o productos inacabados) y salidas (productos acabados/inacabados, coproductos y residuos) de cada unidad del sistema (subsistemas), y en función de los objetivos propuestos y de los intereses del agente promotor, los resultados serán canalizados para diversos fines (cambios de tecnologías, optimización de costes, estrategias de mercado, minimización del impacto al medio ambiente, etc.)

En la figura 2.2, se muestra los flujos de un sistema genérico. El objetivo es demostrar como este tipo de esquema auxilia la visualización holística de un cierto proceso de producción o producto.

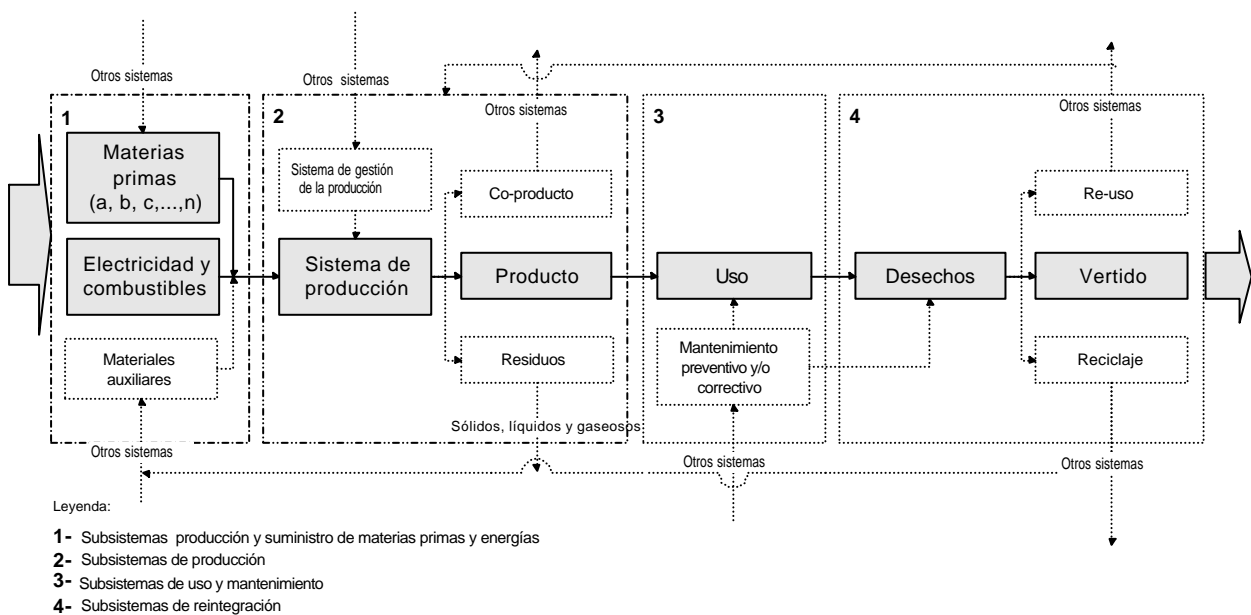


Figura 2.2 – Flujo genérico del ciclo de vida de un producto

Con una visión global del sistema se puede enfocar objetivamente determinado subsistema, etapa o fase de su ciclo de vida y atribuirle los parámetros correspondientes para el análisis. Por ejemplo, cuando los aspectos medioambientales del sistema sean el objeto del análisis, será posible asignarlos a cada uno de los agentes que interviene en ese proceso concreto. En general, las intervenciones realizadas en los procesos de producción y sistemas de soporte de la etapa 2, serán atribuidas a determinados agentes intervinientes del proceso, de la misma manera que las que las retrospectivas (etapa 1) o las prospectivas (etapas 3 y 4) serán atribuidas a otros agentes que intervengan en el sistema. Es el caso concreto de los suministradores de material y energía, usuarios o administración pública. Como muestra la figura 2.3, si el subsistema de producción es considerado el foco del sistema global, los demás subsistemas funcionarán como “satélites”, y les corresponderán algunas de las variaciones del flujo que se puedan producir.

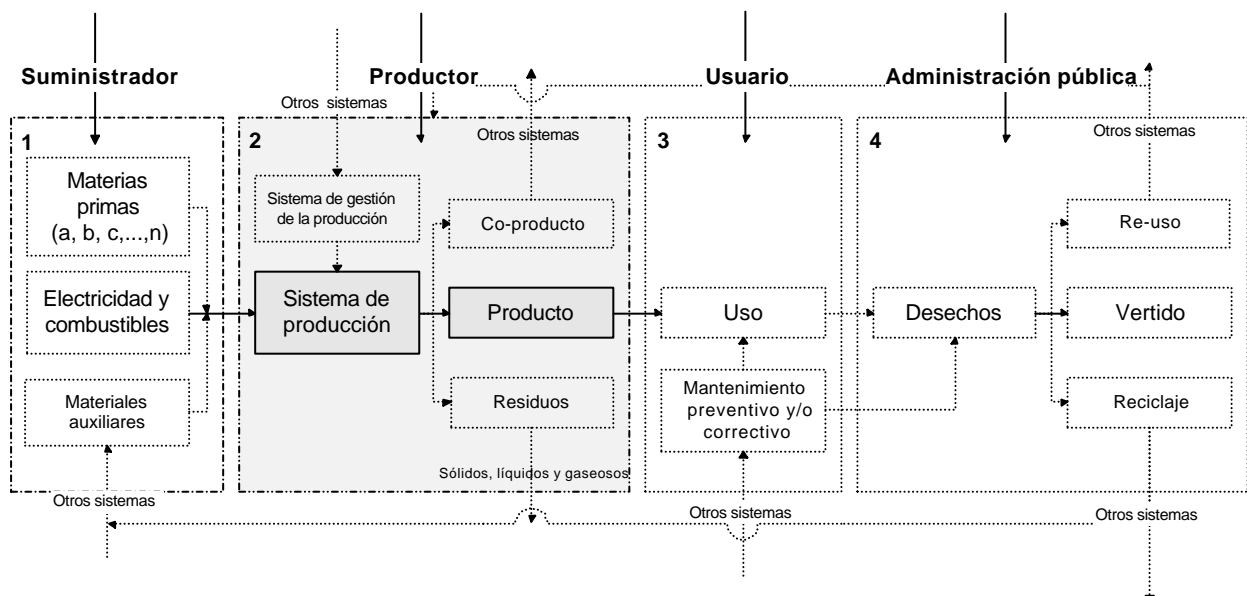


Figura 2.3 –Ejemplo de atribución de responsabilidad por etapa del ciclo de vida

Estas consideraciones son útiles cuando se aplican al ámbito de la construcción (edificaciones u obras civiles), en este caso, se aprecia una diferencia en comparación con otros procesos industriales porque forman parte de una industria que realiza sus procesos *in situ*, es decir, en el lugar donde se lleva a cabo la construcción, que se diferencia de otro proceso industrial en el sentido de la temporalidad y la ubicación. Una vez terminada la obra, la industria se traslada y queda afincada a un nuevo espacio, con una permanencia temporal finita

En contraposición a los productos del sector de la construcción, los productos de las industrias con proceso industrial en serie, están estrechamente relacionadas con las plantas fijas, donde sus productos son colocados a disposición del usuario bajo determinadas condiciones de mercado, incluyendo las condiciones de distribución y ante claras exigencias de consumo. Con

un ciclo de vida corto e intenso, antes y después de consumidos, estos productos generan residuos (embalaje; envase; etc.) que son llevados al vertedero, plantas de reciclaje, etc., es decir, que en general tienen un ciclo de vida completo y un tanto cuanto bien definido.

Generalmente, los productos de la construcción son productos resultantes de plantas industriales que están para cubrir las necesidades específicas del usuario o de un agente promotor. A estos productos todavía les queda un largo período de existencia, y una vez iniciada la demolición es difícil hacer una separación de sus componentes, por factores intrínsecos al propio sistema de producción, hecho que dificulta la reutilización o, incluso, hasta el mismo reciclaje. Básicamente, estos productos están compuestos en su mayoría por materiales inertes, y si bien cuando son llevados al vertedero no contaminan el agua o el suelo, sí que ocupan grandes espacios en zonas de vertidos.

La visión del ciclo de vida del proceso constructivo, dado por Aguado y Casanova [1997] (figura 2.4), muestra dos fases distintas: *construcción* y *desconstrucción*, que por su parte se componen de células correspondientes a las diferentes etapas del ciclo, donde, la célula denominada de *concepción*, constituye el elemento bisagra entre ambas. Este ciclo, como el de cualquier producto o servicio de otro sector, debe tener definido un tiempo de vida útil, el cual en las estructuras del sector de la construcción es mucho mayor que el conocido de otros sectores, consecuentemente, ello ha influido en la percepción de que la construcción también constituye un ciclo.

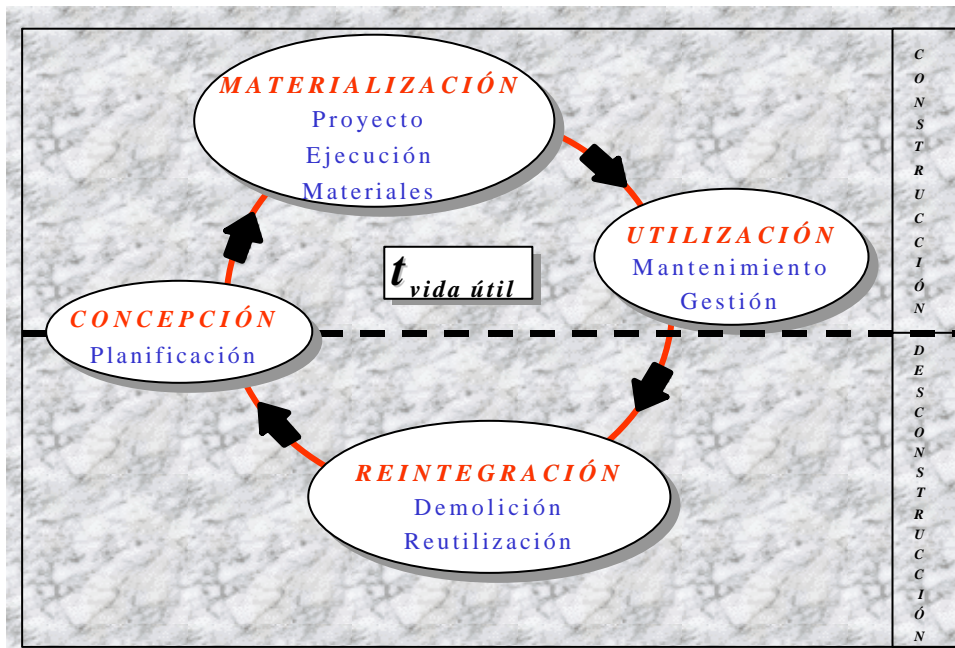


Figura 2.4 – Ciclo de vida del proceso constructivo [Aguado y Casanova, 1997]

Paralelamente, Trinius [1999] subraya que desde el punto de vista medioambiental, la existencia de diferentes contextos a lo largo del ciclo de vida del producto de la construcción, implica la existencia de distintos grados de complejidad en el mismo. En consecuencia, a la hora de analizar los aspectos medioambientales de sus sistemas es determinante establecer diferentes niveles para lo que se está analizando y, así, utilizar una estrategia adecuada a cada estudio. Por ejemplo, enfocar el análisis del sistema utilizando como referencia el ciclo de vida global del producto de la construcción, puede representar un riesgo metodológico significativo, teniendo en cuenta la complejidad de cada etapa del ciclo de vida y que puede dificultar el logro de los objetivos planteados. (véase la tabla 2.2)

En la figura 2.5, se aclara con un esquema para ejemplificar los diferentes niveles del producto de la construcción que pueden ser objeto de análisis.

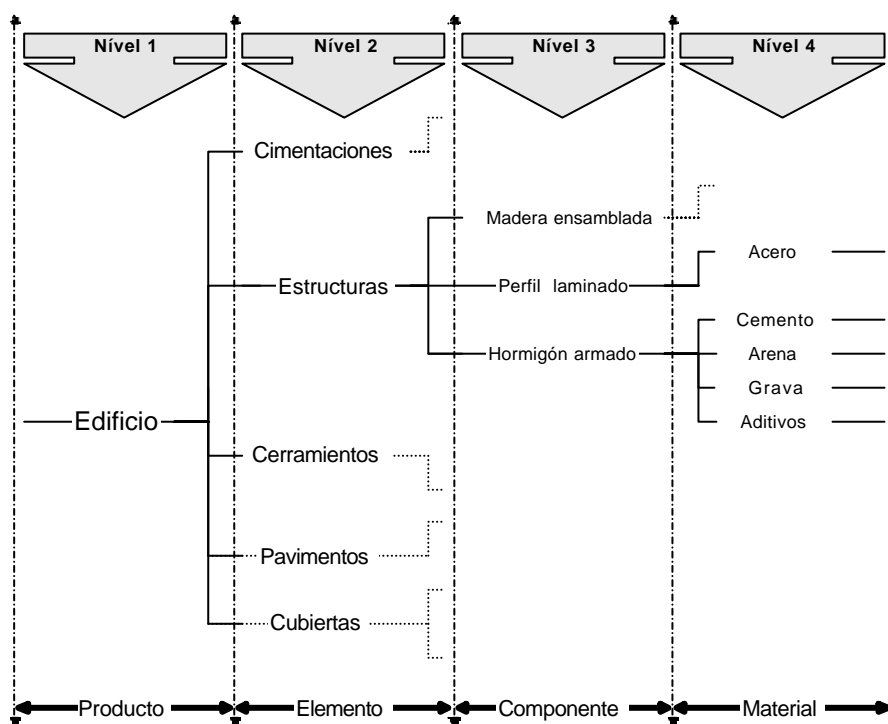


Figura 2.5 - Diferentes niveles para aplicar el estudio del ciclo de vida del producto de la construcción

Para ilustrar esta complejidad, se muestran en la tabla 2.2, algunos impactos potenciales de los productos de la construcción, según los diferentes niveles del producto a lo largo de todo su ciclo de vida.

Producto de la construcción	Ciclo de vida		
	Producción	Uso y mantenimiento	Reintegración
Material de construcción (nivel 4)	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de energía y recursos naturales en los procesos producción y transportes; • Producción de ruidos y vibraciones; • Producción de residuos por excedentes de procesos y embalajes; • Emisiones contaminantes del aire, agua o suelo (Transfronteriza y locales); • Perturbación del entorno con impacto visual. 	<ul style="list-style-type: none"> • Impactos potenciales traspuestos al producto intermedio o final que lo utiliza.. 	<ul style="list-style-type: none"> • Impactos potenciales traspuestos al producto intermedio o final que lo utiliza..
Componente o elemento (nivel 2 o 3)	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de energía y recursos naturales en los procesos de producción y transporte; • Producción de ruidos y vibraciones; • Producción de residuos por excedentes de procesos y embalajes; • Emisiones de partículas al aire (p.ej.:polvo); 	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de energía y recursos en los procesos de mantenimientos; • Producción de residuos o sustancias tóxicas, en función de los procesos de mantenimiento, su naturaleza y vida útil; 	<ul style="list-style-type: none"> • Impactos potenciales traspuestos al producto final que lo utiliza.
Edificio u obra civil (nivel 1)	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de energía y recursos en los procesos constructivos; • Producción de ruidos y vibraciones; • Producción de residuos por excedentes de obra y embalajes; • Emisiones de partículas al aire (p.ej.:polvo); • Impacto visual. 	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de energía y recursos naturales, en función de la naturaleza de uso y vida útil; • Producción de ruidos y vibraciones, en función de la naturaleza de uso y vida útil; • Producción de residuos (desechos, aguas residuales y sustancias tóxicas), en función de la naturaleza de uso y vida útil; • Perturbación del entorno (tránsito, aparcamiento, etc.), en función de la naturaleza de uso y vida útil; 	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de energía en los procesos de demolición; • Producción de ruidos y vibraciones; • Emisiones de partículas al aire (p.ej.:polvo); • Producción de residuos por demolición descontrolada o selección para reciclado; • Consumo de energía en los procesos de transportes, selección y machaqueo (reciclado); • Impacto visual

Tabla 2.2 – Impactos potenciales al medio ambiente del producto de la construcción

2.2.2 - Políticas medioambientales relacionadas con el sector de la construcción

En 1992, se realizó en Río de Janeiro (Brasil), la “Cumbre de la Tierra” o Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, representando un importante marco en la lucha para proteger el medio ambiente. Allí, 178 gobernantes firmaron diversos acuerdos que tenían como objetivo desarrollar estrategias integradas para procurar detener e invertir las consecuencias negativas que causan principalmente las actividades humanas sobre el medio ambiente.

En aquella ocasión se firmaron tres importantes documentos:

- Agenda 21- Plan de acción en pro del desarrollo sostenible mundial;
- Declaración de Río sobre el medio ambiente y el desarrollo; y
- Declaración de Principios para orientar el desarrollo forestal sostenible en el mundo.

Entre los acuerdos firmados por todos aquellos países signatarios está el compromiso de elaborar sus propias “*Agenda 21*” y, en ellas, concretar sus políticas y planes de protección del medio ambiente, organizando, orientando y educando a los sectores productivos más representativos hacia una producción y un consumo equilibrado con el desarrollo sostenible.

En la Agenda 21, España [1999] se identifica con varios programas que directamente involucran e interesan al sector de la construcción. Entre ellos se subraya:

- Programa para la mejora de la eficiencia energética de la edificación;
- Programa para la potenciación de un transporte sostenible; y
- Programa Industrial y Tecnológico Medioambiental (PITMA).

De éste último, que desarrolla el tema de la producción sostenible, se pueden señalar los acuerdos voluntarios firmados entre la administración (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía – IDEEA) y asociaciones del sector de los materiales de construcción. [Agenda 21-España, 1999]

Además de estos programas, recomendaron utilizar el estudio del ciclo de vida completo del producto como referencia conceptual para evaluarlo medioambientalmente. Todo ello representa un gran impulso para que otras asociaciones se unan con los mismos propósitos, rompiendo la inercia dominante del sector y dando la posibilidad al mercado consumidor para disponer pronto de productos evaluados medioambientalmente.

En realidad, todas estas políticas de ámbito nacional, son aplicaciones de reglas definidas en protocolos internacionales que fijaron objetivos claros para disminuir los efectos negativos sobre el medio ambiente, que viene causado por emisiones de sustancias transfronterizas, por ejemplo, aquellas que causan el agotamiento de la capa de ozono y las que influyen al cambio climático (sustancias del efecto invernadero)

El Protocolo de Montreal (1987) y el Protocolo de Kyoto (1997) son respectivamente dos ejemplos de acuerdos marco para estas políticas medioambientales. El primero está relacionado con las sustancias que agotan la capa de ozono que protege el planeta y en el segundo acuerdo, todos los países que fueron signatarios, se comprometieron a reducir las emisiones de los gases que contribuyen al efecto invernadero. En ambos casos, aparecen como fuentes emisoras las industrias manufactureras y de la construcción. Por ejemplo, con respecto a las sustancias que contribuyen al efecto invernadero, en conjunto, los países signatarios se comprometen a reducir estas emisiones como mínimo en un 5% con respecto a los niveles de 1990, en el período comprendido entre los años 2008 y 2012. [ONU, 1997]

Además, bajo los mismos conceptos, la Unión Europea ha fijado la protección del medio ambiente a través de sus directivas comunitarias y en el conjunto de sus políticas, mediante la determinación de los niveles máximo de emisiones de determinadas sustancias contaminantes y, conjuntamente, con la recomendación de que los sectores productivos busquen adecuar sus sistemas y procesos para una *mejor tecnología disponibles* o *BAT* (del inglés Best Available Techniques), como medio para reducir estas contaminaciones. Tales medidas se aplican a las nuevas plantas desde el año 1999, además, todas las plantas industriales existentes han de enmarcarse progresivamente dentro de esta normativa hasta la consecución plena en el año 2007. [COM, 2000].

2.3 - SISTEMAS DE EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL

Como se ha indicado en apartados anteriores, todos los sistemas de producción, procesos o servicios poseen un ciclo de vida que puede estructurarse de forma sistémica, con un principio y un final previamente establecido. En general, este ciclo de vida, que está compuesto por varios subsistemas conectados entre sí en forma de flujo progresivo, se inicia con la adquisición de las materias primas, pasando por otros subprocesos intermedios, hasta llegar al final de su vida útil cuando son llevados a vertederos.

Todo el proceso de este ciclo de vida se considera el ciclo completo, y es común denominarlo desde la “cuna hasta la tumba”, entre tanto, mientras exista la posibilidad de la reutilización o reciclado, la denominación del proceso puede cambiar y asumir otra disposición, como por ejemplo de la “cuna hasta la cuna”, o desde la “cuna hasta la puerta”, etc. Para ilustrar,

en la figura 2.6, se enseña otra visión del ciclo de vida en el proceso de la construcción. [Ecobilan, 2000]

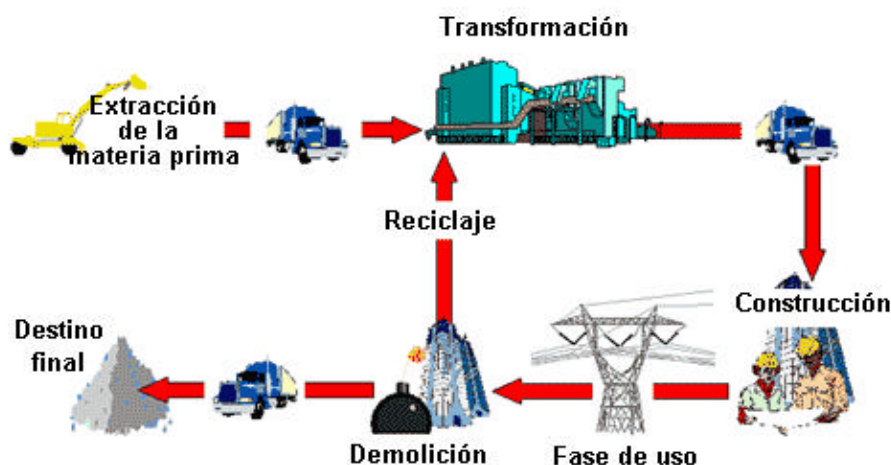


Figura 2.6 – Concepto del ciclo de vida del producto de la construcción [Ecobilan, 2000]

A lo largo de este ciclo de vida, ocurren continuas interrelaciones entre el entorno ambiental, los flujos de material y energía, y los productos y emisiones ubicados dentro o fuera de los límites del sistema considerado.

La necesidad de estudiar, desde el punto de vista medioambiental, todas estas interrelaciones exigirá el empleo de métodos fiables que cuantifique o valore todas estas acciones y sus efectos. Así, a la hora de tratar este tema es necesario proporcionar las respuestas adecuadas para atender a los objetivos esperados, entonces habrá que emplear herramientas que permitan medir los diversos tipos de parámetros, tanto aquellos clasificados de cuantificables como los de difícil cuantificación. Entre los parámetros cuantificables están incluidos los relacionados con el consumo de materias primas, consumo de agua y energía, emisiones de efluentes líquidos, emisiones de gases a la atmósfera, residuos sólidos, generación de coproductos, etc. Estos parámetros, pueden ser tratados a través de modelos, como por ejemplo, los de la base conceptual del análisis del ciclo de vida. Mientras los de difícil cuantificación, por ejemplo, los riesgos potenciales, cambios geográficos, impactos visuales del entorno o escasez de recursos son tratados con otras herramientas desarrolladas para tal fin. [Álamo, et al., 1998; Trinius, 1999]

Además, en el marco de la gestión medioambiental hay que tener en cuenta que las intervenciones propuestas pueden afectar al plan estratégico de corto o largo plazo, o hasta las mismas rutinas diarias de trabajo, por lo tanto es interesante contar con diferentes fuentes de informaciones a la hora de tomar ciertas decisiones, principalmente si éstas cambian procesos,

materiales o servicios, o seleccionan materiales alternativos o rastrean actividades identificando, activando o investigando nuevos aspectos medioambientales de un determinado producto.

En este punto del proceso se debe considerar que cada una de estas herramientas ofrecen diferentes formas de afrontar el problema y suministran diversas informaciones útiles a la hora de una toma de decisión, teniendo en cuenta que cada una de ellas recoge, estructura y valora informaciones según determinados aspectos, resultando, en algunos casos, hasta complementarios entre sí.

Mientras se fija el desarrollo de esta metodología, en la tabla 2.3 se presenta algunas de las principales herramientas hoy disponibles para la gestión medioambiental de sistemas de producción o producto. [SETAC 1999]

RA - <i>Risk Assessment</i>	➔	<i>Análisis de riesgos ambientales</i>
EIA - <i>Environmental Impact Assessment</i>	➔	<i>Estudio del impacto ambiental</i>
EAu - <i>Environmental Auditing</i>	➔	<i>Auditoria ambiental</i>
EPE - <i>Environmental Performance Evaluation</i>	➔	<i>Evaluación del comportamiento ambiental</i>
SFA - <i>Substance Flow Analysis</i>	➔	<i>Análisis del flujo de sustancia</i>
EMA - <i>Energy and Material Analysis</i>	➔	<i>Análisis de material y energía</i>
ISCM - <i>Integrated Substance Chain Management</i>	➔	<i>Gestión integral de sustancia</i>
PLA - <i>Product Line Analysis</i>	➔	<i>Análisis de línea de producto</i>
LCA - <i>Life Cycle Assessment</i>	➔	<i>Análisis del ciclo de vida</i>

Tabla 2.3 – Herramientas conceptualmente similares usadas en los sistemas de gestión ambiental [SETAC, 1999]

a) Análisis de riesgos ambientales

El análisis de riesgos ambientales cubre una amplia gama de aplicaciones. Por ejemplo, con esta herramienta se pueden evaluar los riesgos ecológicos ocasionados por fuentes puntuales o difusas de emisiones, emisiones frecuentes o accidentales. También permite evaluar riesgos para la salud humana en el ámbito laboral, así como para ambientes exteriores con un cierto foco contaminante.

En general, esta herramienta se utiliza con enfoque analítico (cualitativo) y con criterios de probabilidad para estimar los riesgos que pueden resultar en situaciones adversas. Habitualmente se consideran los niveles de concentración y/o períodos de exposición de una determinada sustancia peligrosa en el ambiente, para luego estimar comparativamente con los criterios establecidos para definir si están ante niveles aceptables de riesgo.

La principal ventaja de análisis de riesgo es permitir pronosticar posibles impactos reales. Sin embargo, los datos para realizar estos pronósticos, dictan ciertas limitaciones a esta herramienta con respecto al consumo de tiempo y recursos y, consecuentemente, justificando su empleo para actividades de alto riesgo.

b) Estudio del impacto ambiental

La EIA es utilizada para investigar los cambios ambientales de un sitio específico, tal como los ocasionados por las construcciones (p.ej. plantas eléctricas, carreteras, ferrocarriles, plantas industriales), la EIA es una herramienta orientada para planteamientos físicos, referidos a la gestión del territorio. Considera los efectos ambientales durante el período de construcción así, como también los que ocurren durante la operación de la planta, siendo comúnmente requerido para conseguir una licencia de construcción o de operación en una planta.

En general, los datos ambientales de la EIA son detallados con respecto a un impacto específico y, frecuentemente, pueden tener en cuenta la duración y concentración de los contaminantes emitidos mediante la evaluación de su incidencia sobre el ambiente.

c) Auditoria ambiental

Según la definición de la ISO 14010:1996, la auditoria ambiental es "un proceso sistemático, objetivamente documentado, para verificar y evaluar evidencias y determinar específicamente que aspectos ambientales, eventos, condiciones, sistemas de gestión o informaciones sobre esta materia, están conforme criterios previamente definidos, comunicando los resultados de este proceso al cliente"

El origen de la *Auditoria ambiental* surge de la necesidad de realizar inspecciones físicas en determinados puntos concretos del proceso para verificar el cumplimiento legal, identificar responsabilidades y riesgos importantes. En este contexto, auditar es propio de la gestión para conseguir la "calidad total". Aquí se incluyen chequeos de los sistemas instalados para verificar si operan como deberían, permitiendo así una constante evaluación de mantenimiento de objetivos del conjunto operante. Sin embargo, el foco de la Auditoria ambiental se centra en la actividad que está siendo revisada y no sobre datos retrospectivos o prospectivos del proceso.

d) Evaluación del comportamiento ambiental

Es una herramienta interna que suministra al sistema de gestión ambiental informaciones fiables, objetivas y verificables, de este modo se ayuda a la organización a determinar los logros en sus objetivos ambientales. Es, por lo tanto, un sistema de auditoría interna, que se basa en indicadores para medir, evaluar y verificar el comportamiento ambiental de una organización con respecto a determinados criterios preestablecido en su sistema de gestión (intenciones y objetivos ambientales)

Permite enfocar tendencias de comportamiento medioambiental para una gama de actividades de una organización, es decir, los recursos consumidos, el proceso utilizado, productos y servicios resultantes.

e) Análisis del flujo de sustancia

El análisis del flujo de sustancia es una herramienta que permite hacer un balance del flujo de una determinada sustancia, a lo largo de todo el ciclo de vida de un sistema, incluyendo la producción y el uso de cierto producto a través de la contabilización de todas sus entradas y salidas.

Con esta herramienta se puede mejorar la calidad medioambiental de un determinado producto a través de la aplicación de medidas de control o de reducción de una sustancia específica. Sin embargo, presenta el inconveniente de que al hacer referencia a una sola sustancia no es un método holístico y, por lo tanto, si ocurrieran cambios en el sistema como resultado del aumento del flujo de otras sustancias, éstas no podrían ser identificadas con el análisis de flujo de sustancia.

f) Análisis de material y energía

Se considera como el precursor del análisis del ciclo de vida, de hecho, las dos herramientas se confunden, ya que conceptualmente pueden compartir la misma base de datos. Utilizan como referencia la unidad funcional del sistema y su interpretación también está basada en el impacto potencial al medio ambiente causado por ciertas emisiones.

La herramienta también utiliza algoritmos para cuantificar todos los materiales y energías que entran y salen de un determinado sistema bajo estudio, admitiendo evaluar cierta etapa o fase del ciclo de vida de un producto.

g) Gestión integral de sustancia

La gestión integral de sustancia sirve tanto como apoyo a la toma de decisiones, como para comparar diferentes opciones con respecto a ciertas mejoras ambientales o económicas de un sistema. Se formula un plano práctico de acción más amplio que un simple análisis de aspectos medioambientales. Esencialmente, se hace un atajo en el de ciclo de vida completo de un determinado producto, puesto que con el análisis de sólo 20% de elementos, podría conocerse un 80% de impactos totales en el sistema. Es conocido como el precursor del análisis del ciclo de vida simplificado.

h) Análisis de línea de producto

Muy similar al análisis del ciclo de vida, utiliza como base de comparación la unidad funcional del sistema. Presenta un espectro más amplio de análisis, ya que incorpora como foco de investigación, además del análisis medioambiental, otros aspectos de tipo económico y social. Es considerada una herramienta conceptualmente correcta, aunque a la práctica se utiliza poco. [Fullana, 1997]

i) Análisis del ciclo de vida

El ACV es una herramienta de gestión ambiental que identifica tanto a los recursos usados como a los residuos que se generan y se emiten a los vectores ambientales (aire, agua y suelo) a lo largo de todo el ciclo de vida (desde la cuna hasta la tumba) de un bien o un servicio específico.

Entre sus puntos fuertes se puede mencionar, primeramente, su carácter globalizador, que evita el traslado del problema; por ejemplo, evita que la solución a un problema ambiental particular ocasione el deterioro de otra parte del ciclo de vida, o a otro vector ambiental; y en segundo lugar, muestra una relación de todos los recursos usados, así como de los residuos o emisiones generadas por la unidad funcional del sistema, permitiendo así algún tipo de evaluación.

Durante la evaluación del impacto del ciclo de vida (LCIA) se emplean modelos desarrollados para interpretar datos y efectos sobre el ambiente. Sin embargo, a causa de la carencia de detalles temporal y espacial en la base de datos, los impactos reales no pueden ser evaluados usando el ACV, ya que éste mide únicamente impactos potenciales.

Es evidente que dentro de esa misma línea conceptual existen otras herramientas que tienen un carácter similar al ACV, permitiendo, en algunos casos, la asociación de resultados. Así, a la hora decidir por la selección de la herramienta más adecuada para valorar los aspectos

medioambientales de un producto o proceso planteado, es necesario un análisis detallado que tenga en cuenta todos los puntos fuertes y débiles, como por ejemplo la potencialidad necesaria para alcanzar los objetivos pretendidos y así escoger la que mejor se adecue a las necesidades del usuario o promotor del estudio. [SETAC, 1999]

Wrisberg et al. [1997] consideran que a pesar de que en algunos casos no sea posible realizar el análisis del ciclo de vida completo de un producto, asimismo el ACV aún resulta útil como herramienta para la gestión medioambiental de sistemas de producción, pues posibilita identificar el foco del problema, optimizar el uso de los recursos materiales o energéticos y gestionar los residuos producidos. Además, el ACV se presta para comparar dos o más productos alternativos que cumplan una misma función, y también para valorar materiales alternativos contribuyendo así al desarrollo de materiales más respetuosos con el medio ambiente.

La tabla 2.4 adjunta presenta, de forma resumida, los objetivos, puntos fuertes y débiles de cada una de las metodologías descritas basándose en la fuente del SETAC [1999]. En ella puede verse la potencialidad del ACV como herramienta para gestionar los aspectos medioambientales, especialmente por su adecuación a aquellos estudios que tengan como base conceptual el ciclo de vida del producto o servicio.

2.4 - EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA – ACV -

El análisis del ciclo de vida se define como la herramienta adecuada para “la recopilación y valoración de las entradas (materia y energía), salidas (productos, emisiones y residuos) e impactos potenciales de un sistema de producción o servicio a lo largo de su ciclo de vida”. Conceptualmente este método se mantiene en natural y constante desarrollo, pues a medida que son divulgados nuevos trabajos prácticos con su aplicación, se intercambian informaciones entre usuarios de ésta metodología. Todo ello implica un constante proceso de retroalimentación evolutiva en el método, a ejemplo de lo que ocurrió anteriormente con otras metodologías de gestión. [ISO 14.040, 1997; SETAC, 1998].

La figura 2.7 muestra el marco del ACV propuesto en la ISO 14.040:1997, compuestos por cuatro elementos básicos:

- Definición del objetivo y alcance
- Análisis del inventario
- Evaluación del impacto
- Interpretación de los resultados

Herramientas	Objetivos generales	Puntos fuertes	Puntos débiles
RA	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Valorar los efectos adversos asociados a una situación específica de riesgo y sus interrelaciones con la salud humana y el medio ambiente. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Evalúa los efectos locales y regionales bajo condiciones específicas 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Es capaz de consumir mucho tiempo y recursos. ▪ No es capaz de apuntar la ubicación del riesgo a lo largo del ciclo de vida
EIA	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Evaluar los impactos positivos y negativos sobre el medio ambiente de un determinado proyecto planteado. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Calcula tanto efectos positivos como negativos. ▪ Considera los impactos locales de un proyecto 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No es capaz de apuntar fácilmente la ubicación de un efecto global / regional o otros efectos a lo largo del ciclo de vida
EAu	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verificar la conformidad con determinados requisitos normativos vigentes, por medio de chequeo realizado por tercera parte. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Proporciona una manera para que una tercera parte, independiente, compruebe los resultados. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Enfoca una conformidad y enfatiza en término medio de más débil que de mejoría.
EPE	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Proporcionar una información fiable, objetiva y comprobable a cerca del desempeño medioambiental de una determinada organización. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Promociona coeficientes de desempeño medioambiental asociándolos a políticas objetivas y metas preestablecidas. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Promociona coeficientes de desempeño relativos y no absolutos.
SFA	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Contabilizar el suministro y la demanda de una sustancia específica que fluye a través del proceso de producción. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Toma en consideración un impacto potencial determinado a lo largo del ciclo de vida. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El enfoque sobre una única sustancia puede apuntar falsos resultados.
EMA	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Calcular el balance energético y material asociado con una operación específica. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Promociona una vía estructurada de identificación y valoración de un impacto potencial de operaciones, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Enfoca solamente una fases del ciclo de vida
ISCM	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Calcular y reducir globalmente el impacto medioambiental de una determinada sustancia asociada. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Permite hacer consideraciones integradas entre económicas y medioambientales en una misma herramienta. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Emplea una valoración simplificada que puede dar respuestas demasíadamente simplificadas.
PLA	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Evaluar potencialmente el impacto medioambiental, social y económico de un bien o servicio a lo largo de todo su ciclo de vida. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Integra aspectos medioambientales, económicos y sociales dentro de una solo herramienta. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No puede valorar específicamente impactos locales
ACV	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Entender el perfil medioambiental de un sistema. ▪ Identificar prioridad de mejorías. ▪ Asegurar mejorías con fundamento en el ciclo de vida. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Considera impactos global y regional. ▪ Posibilita estimar los impactos que en términos influyen la salud de la sociedad. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No es capaz de apuntar el carácter temporal o espacial de un determinado efecto.

Tabla 2.4 – Aspectos generales de las herramientas para la gestión ambiental

Como es posible observar en la figura 2.7, los elementos que estructuran el ACV son interactivos entre sí, lo que representa una flexibilidad para el proceso de evaluación proporcionado por esta herramienta.

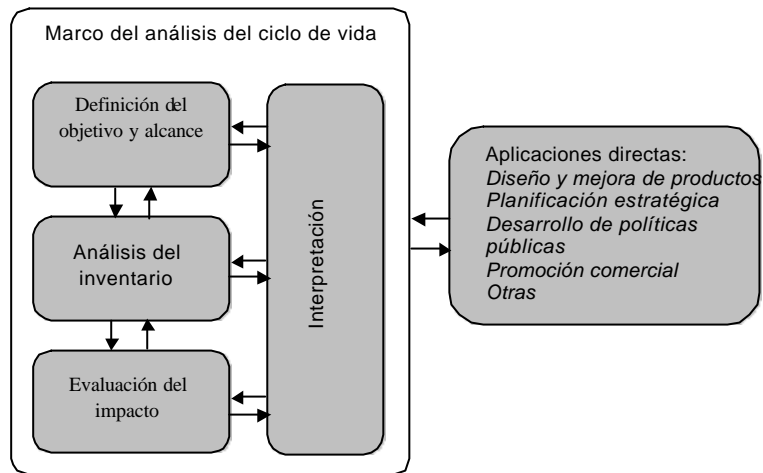


Figura 2.7 - Marco del análisis del ciclo de vida, según la ISO 14.040:1997

En la figura 2.8, se muestran los 4 elementos que componen esta metodología, en forma de flujo continuo y que servirá de guía para, a continuación, presentarse una breve descripción de la metodología, enfocando los puntos más significativos de esta herramienta..

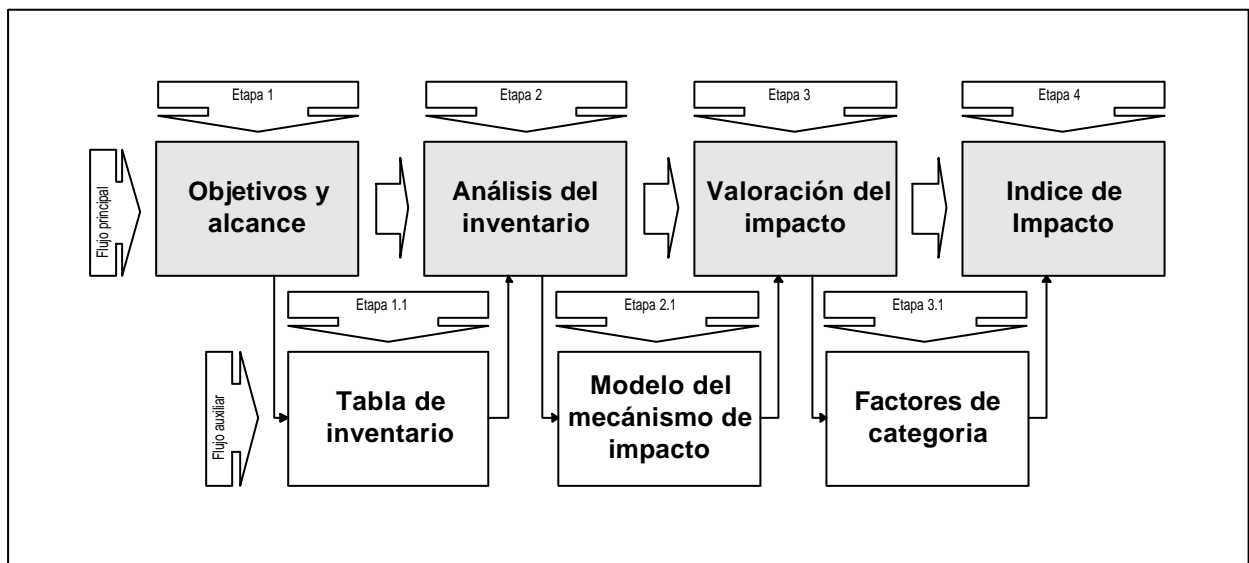


Figura 2.8 – Flujo metodológico del ACV

2.4.1 – Etapa 1 - Definición de los objetivos y alcance del ACV

Este primer elemento del ACV tiene como objetivo agrupar dos tipos de informaciones. En primer lugar, trata de esclarecer sin ambigüedades cuáles son las metas del estudio. Este punto se considera importante para encontrar respuestas para algunas cuestiones determinantes. (Véase figura 2.9)

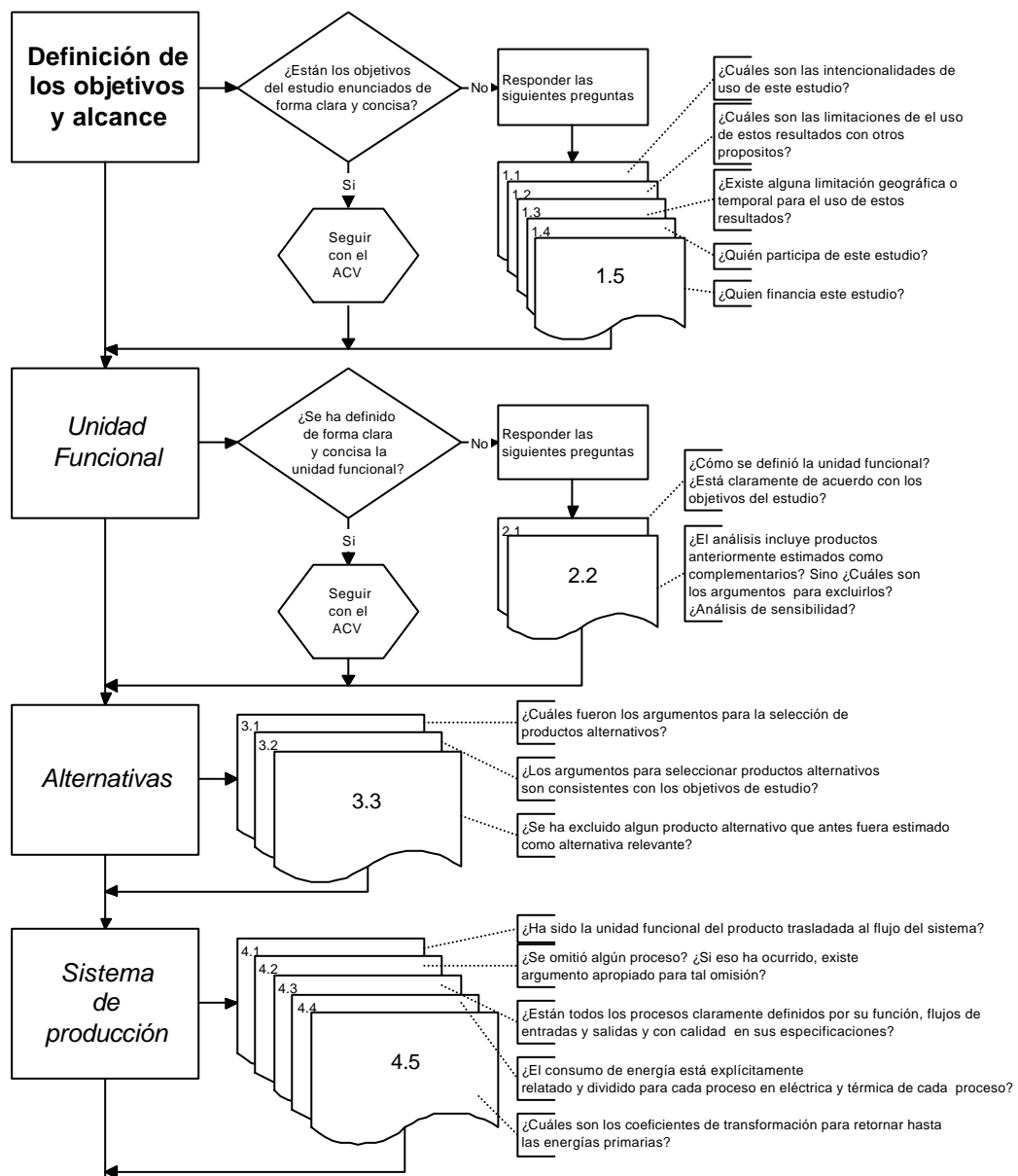


Figura 2.9 – Flujo con lista de chequeo de la 1ª etapa del ACV

El carácter descriptivo de las respuestas a estas cuestiones representa un importante paso documental. En el informe se definen compromisos y responsabilidades para garantizar el empleo ético de los resultados, como también los niveles de accesibilidad de estos resultados. Al mismo tiempo también se establecen límites de carácter temporal y geográfico para el estudio. Sirve además para valorar políticamente los resultados del ACV.

Cuando se refiere a aspectos estrictamente técnicos, la definición del ámbito del estudio, dentro del contexto del método, deberá asegurar la extensión, la profundidad y los detalles del estudio para que esto resulte consistente y garantice, además, que más adelante los resultados sean compatibles con los objetivos iniciales y resulten fiables y reproducibles. [Heijungs, et al. 1992; ISO 14.040:1997; Guinée, et al. 1998]

El carácter interactivo de la metodología del ACV permite que el ámbito del estudio pueda modificarse cuando se recojan informaciones adicionales que perfeccionen los resultados. Otras consideraciones pueden añadirse en el caso de que aporten claridad al estudio.

2.4.2 – Etapa 2 - Análisis del inventario

La ISO 14.041:1998, define el análisis del inventario como el elemento del ACV que "se preocupa por la colección de los datos y los procedimientos de cálculos para cuantificar las entradas y salidas relevantes del sistema de producción en estudio".

Guinée, et al. [1998] en la revisión de la Guía del ACV del Centro de Ciencias Ambientales - CML, de la Leiden University-, basándose tanto en consideraciones de la norma ISO 14.041 de 1998, como en otras referencias, recomienda que se cumplan inicialmente algunos pasos prácticos. Entre estos:

- Partiendo del principio que los procesos fluyen siempre a otros procesos o al entorno ambiental, trazar un diagrama de flujo inicial del proceso, permitirá que de forma gráfica se aprecien los flujos del sistema con todas sus entradas y salidas más relevantes, reuniéndose, de este modo, los datos necesarios.
- La construcción del diagrama de flujo sobre el proceso debe iniciarse a partir del sistema de producción de la unidad funcional, agregando inmediatamente, los procesos adyacentes correspondientes, entre los que se encuentran: los procesos auxiliares, el transporte y el suministro de energía.

Lindeijer [1999] y Trinius [1999] afirman que remontar todos los flujos de entradas y salidas puede significar una regresión infinita en alguna parte del sistema. Por este motivo,

construir el diagrama del proceso serviría de apoyo para redefinir los límites del sistema en estudio, y ayudaría a tomar decisiones a la hora de incluir o excluir determinados sistemas auxiliares que demuestren cierta importancia en el sistema analizado.

Sobre este tema, en la norma ISO 14.041, bajo título de *Procesos pertinentes y no pertinentes*, se recomienda que se tome como base la importancia económica y/o la estimación de la relativa contribución a los impactos medioambientales producidos para definir los límites del sistema, estableciendo un análisis de sensibilidad con la intención de excluir todos aquellos procesos que demuestren poca influencia en el ciclo de vida del producto analizado. Sin lugar a dudas, considerar la especificidad y establecer reglas fijas para cada proceso resulta difícil para el procedimiento; en el momento de tomar tal decisión son necesarios criterios sólidos, perfectamente definidos y plenamente justificados, [Lindeijer, 1999].

Con estas consideraciones, otros procedimientos suplementarios deben constituir la fase de análisis de inventario en la práctica del ACV. Además de lo indicado en la figura 2.10, que sigue a continuación, deben considerarse globalmente los siguientes:

- Refinamientos en los límites del sistema establecido;
- Compilación de los datos y procedimientos de cálculos; y
- Validación de estos datos con respecto a los objetivos y alcance definidos para el estudio.

2.4.2.1 - Recogida, valoración, aceptación y estructuración de los datos

Entre las principales dificultades encontradas para realizar un ACV figuran el disponer de inventarios que sean representativos del sistema objeto de estudio. Además, lo recomendado en esta fase del ACV, es tener mucho cuidado al escoger la base de datos, pues esta opción influye de forma muy significativa en los resultados de la valoración, de aquí que se exija una buena relación de fidelidad entre la base de datos y el sistema estudiado.

Como ejemplo de este riesgo, tomemos la aplicación del ACV en el análisis comparativo entre dos productos competitivos. Queda claro que en estos casos los datos individuales específicos de cada uno de los productos necesitan ser analizados respecto a su representatividad. En consecuencia, aquellos datos obtenidos a través de promedios o por simple estimación serán menos representativos que los obtenidos por mediciones directas del sistema. Con todo, es natural que existan casos donde la aplicación de valores genéricos sean perfectamente aceptables, o incluso que resguarden una cierta representatividad con los objetivos propuestos para el ACV.

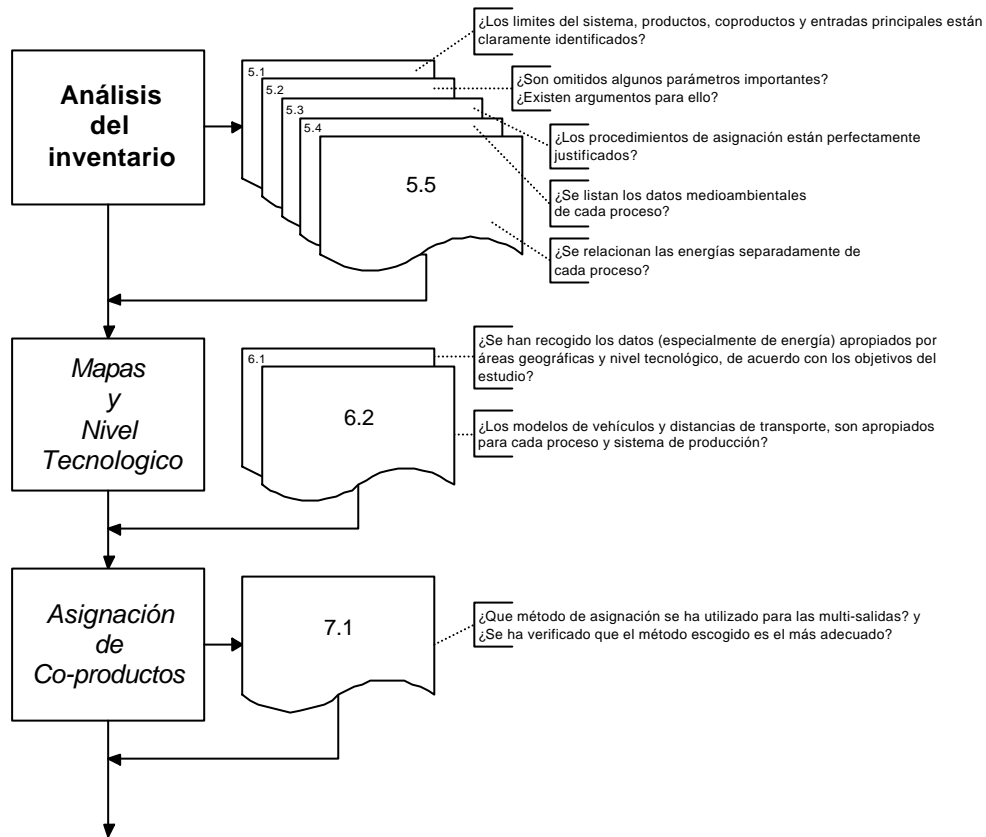


Figura 2.10 – Flujo con lista de chequeo de la 2ª etapa del ACV

En este punto merece destacarse la propiedad de diagnosticar que tiene el análisis del ciclo de vida, ya que a la hora de recopilar los datos del inventario se utilizan factores típicos de funcionamiento del sistema o del producto, éstos tendrán mucha más representatividad que los resultados pronosticados basados en hipótesis de comportamiento. Tomemos como ejemplo los sistemas donde el ciclo de vida es muy largo y dependiente de variables temporales. Entonces parte de su ciclo estará sujeto a estimaciones, ya que se desconoce de forma concreta cómo se comporta el sistema o producto, éstos se tomarán bajo ciertas variables que sino se manifiestan en esta fase o fases del ciclo de vida, introducirán imperfecciones en los datos con las pérdidas de representatividad correspondiente.

En este sentido, hacer una valoración de la calidad de los datos constituye un importante paso para tener en cuenta los niveles de incertidumbres que causan estos datos poco fiables.

Según la ISO 14041 [1998], es necesario definir claramente los métodos que se utilizarán para recoger y componer datos, así como sus aspectos cuantitativos/cualitativos; aquí debe establecerse el nivel de fiabilidad y de representatividad de estos inventarios.

Además hay que fijar otros parámetros de representatividad, como el tiempo de validez, la zona geográfica y la tecnología que incluye el inventario, de igual modo que los requisitos cualitativos definidos en los objetivos y en el alcance del ACV propuesto.

Por su parte a la hora de preparar la presentación de los datos del inventario, debe tenerse en cuenta que la claridad de la información desempeña un importante papel a la hora de manejarlos en las distintas fases del ACV. Según sugiere la ISO 14.041:1998, la estructuración debe ser clara y los datos asociados a cada flujo de entrada y salida de cada unidad del proceso o producto y sus valores deben indicarse debidamente.

Es importante destacar que, en esta dirección, la contribución a la metodología del ICV puesta por la Sociedad para la Promoción y Desarrollo del Análisis de Ciclo de Vida - SPOLD con el desarrollo de un programa con soporte informático (SPOLD - Format software – disponible gratuitamente en la red Internet), resulta bastante interesante a la hora de estructurar estos datos y integrarlos a una base de datos amplia y pública para atender los que practican el ACV.

Sobre este tema, Erixon, M. & Sara, A. [1998] realizaron un amplio análisis que concluyó con la recomendación de emplear un lenguaje más comprensible y una estructuración más flexible, de modo que se fijen de forma más clara los datos en cada sitio. Conjuntamente, se afirma que la adquisición de datos es una tarea costosa y que consume largas horas de trabajos y de coyunturas con los diversos agentes involucrados en el sistema que se está analizando, pues representan el “corazón” del método. [Trusty, 1999]

2.4.3 – Etapa 3 - Evaluación del impacto

Este tercer elemento del ACV, tiene por objetivo valorar los resultados del análisis del inventario del producto o servicio en cuestión, cuantificando los posibles impactos medioambientales. Consta de una fase técnica, considerada obligatoria por la metodología y, otra opcional (de carácter político), por parte del interesado del proyecto. Los resultados tienen un valor informativo añadido para la toma de decisiones.

Como puede observarse en la figura 2.11, propuesta por la ISO 14042:2000, en esta fase de la metodología del ACV se identifica como obligatorio, cumplir los tres pasos siguientes: selección y definición de las categorías de impacto, incluyendo los indicadores de categoría y modelos de valoración utilizados; asignación de los resultados del análisis del inventario conocido como la fase de *clasificación* y el cálculo de los indicadores de categoría, conociéndose este paso como *caracterización*. Todos estos elementos se describen de forma sintética a

continuación, a la vez que se muestran algunos modelos utilizados para el cálculo de los indicadores de categorías de impacto.

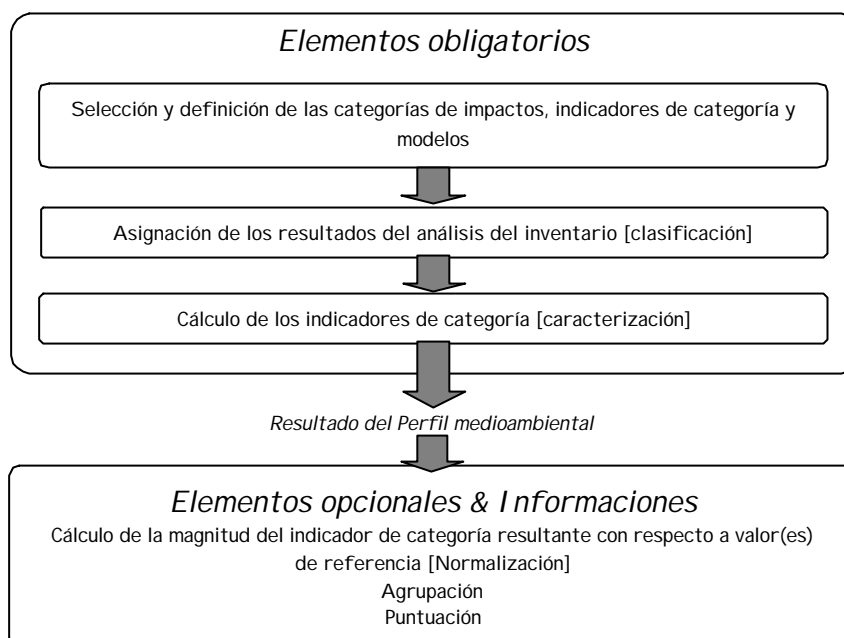


Figura 2.11 - Elementos que componen la valoración del impacto del ACV [ISO 14.042, 2000]

Asimismo, con respecto a los elementos opcionales e informaciones, mientras sean optativos, también se hacen algunas consideraciones de importancia y pasos a seguir para su elaboración.

2.4.3.1- Selección y definición de las categorías de impacto, indicadores de la categoría y modelos de estimación

En síntesis, las categorías de impactos son los efectos sobre el medio ambiente que causan los aspectos medioambientales del sistema o producto en estudio. Estos efectos serán seleccionados y definidos teniendo en cuenta el potencial impacto que pueda generar el sistema o producto en estudio, de hecho, éstos son los objetivos y alcance del ACV.

Las categorías de impactos medioambientales se agrupan según parámetros asociados a los flujos de entrada y salida del sistema. El Centro de Ciencias Ambientales (CML) de la Universidad de Leiden – Holanda - [1992], clasificó algunas de estas categorías de impacto tal y como se muestra en la tabla 2.5. Estas categorías, a su vez, tendrán distintos ámbitos de actuación: global, regional o local.

Entradas	Consumo -recursos renovables
	Consumo -recursos no renovables
Salidas	Calentamiento Global
	Incidencia en la capa de ozono
	Acidificación
	Eutrofización
	Formación fotoquímica de ozono
	Contaminación del aire por partículas
	Carcinógenos
	Metales pesados

Tabla 2.5 - Categorías de impactos consideradas más relevantes [CML, 1992]

Organizado jerárquicamente por el ámbito de acción, a continuación se describen algunas de esas categorías de impacto relacionadas con las salidas de los sistemas, mientras el consumo de energías constituye entradas al sistema sus evaluaciones ocurrirán en el ámbito de sus subsistemas producción. Asimismo, se indican algunas de las principales sustancias que desencadenan el mecanismo de actuación de las diferentes categorías de impactos señaladas.

a) Efecto global

De forma esquemática, en la figura 2.12 se resume el mecanismo medioambiental del calentamiento global. Durante el proceso, los gases del efecto invernadero forman un “escudo” que atrapa localmente parte de la energía irradiada. Debido a ello las capas más bajas de la atmósfera se calientan, propiciando el calentamiento de la superficie del planeta. Las consecuencias, previstas por los expertos en climatología, son que se elevará de 1,4° C a 5,8° Celsius la temperatura media de la tierra en los próximos 100 años. Este cambio climático traerá consecuencias diversas, entre otras, aumento de la temperatura en los polos terrestres con deshielo de los glaciares; aumento del nivel de los océanos con pérdida de territorio de algunos países insulares; propagación de enfermedades tropicales a otros países de clima temperado; etc.

El impacto del efecto invernadero se explica utilizando el modelo del *Global Warming Potential* (GWP), definiendo, el GWP de una cierta sustancia como el cociente entre el resultado de su contribución a la absorción de la radiación térmica instantánea realizada por 1 kilogramo de gas del efecto invernadero emitido, con relación a la misma cantidad emitida de dióxido de carbono (CO₂), integradas a lo largo del tiempo. Así, de este modo, el factor de caracterización

del CO₂ como gas del efecto invernadero es igual a “1” y se expresa en la unidad de CO₂ equivalentes, según la ecuación dada por Wenzel [1998]

$$GWPT_{,i} = \frac{\int_0^T a_i c_i(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} c_{CO_2}(t) dt} \quad [2.1]$$

a_i = Fuerza radiactiva por unidad de concentración que incrementa el gas del efecto invernadero i ;

$c_i(t)$ = Concentración del gas de efecto invernadero i después de emitido en relación con el tiempo t ;

T = El número de años a lo largo del cual hay que hacer la integración.

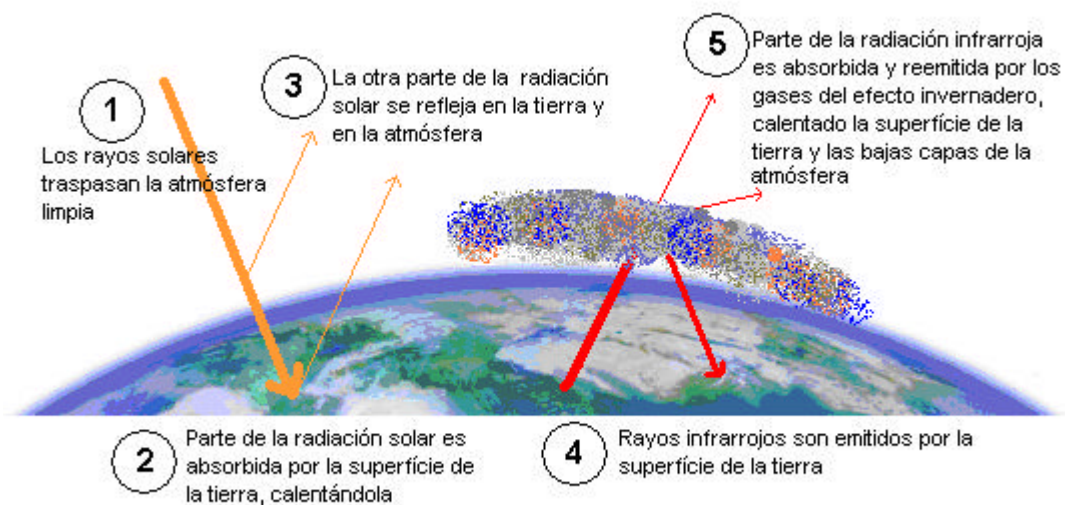


Figura 2.12 – Mecanismo del calentamiento global. [Fuente: IPCC]

b) Efecto regional

Entre las categorías de efecto regional, se han elegido para ejemplificar su mecanismo dos de ellas: la *Acidificación* y la *Eutrofización* cuyos impactos medioambientales son originados, principalmente, por las emisiones del SO₂ y NO_x.

Acidificación

La acelerada degradación física sufrida en los últimos años por los edificios históricos y otras instalaciones cercanas a los grandes centros urbanos ha supuesto una creciente preocupación entre el sector de la construcción y las administraciones con respecto a la durabilidad de materiales estructurales pétreos y metálicos. Esta preocupación también se extiende a otros ámbitos, por ejemplo, en el ámbito de la agricultura, ya que se está produciendo una disminución de zonas forestales cercanas a las zonas industriales o el ámbito sanitario, por un cambio de acidez de las aguas superficiales

En síntesis, la acidificación conlleva, concretamente, este deterioro del medio ambiente y, en consecuencia, la permanencia por tiempo limitado de las sustancias acidificantes en la atmósfera, en la zona cercana al punto de emisión. Esta categoría de impacto se considera regional, como ilustra la figura 2.13. [Wenzel, 1998]

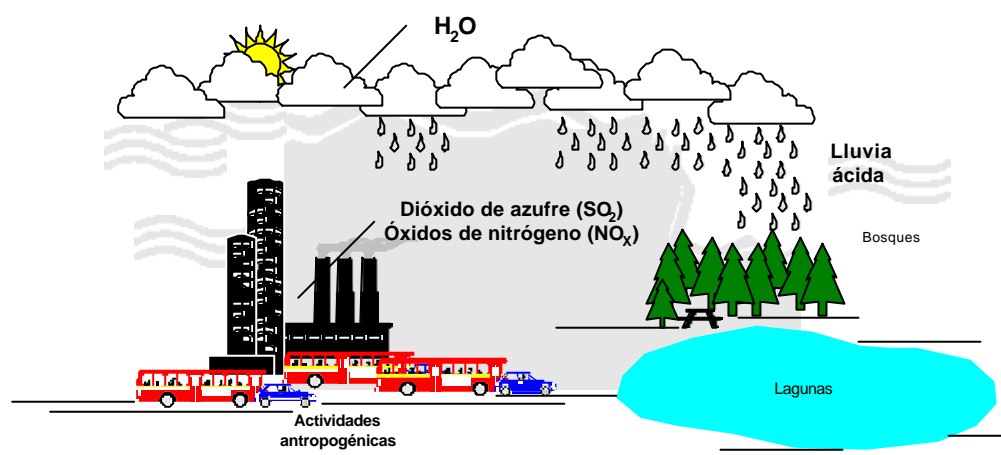


Figura 2.13 – Mecanismo de la acidificación con efecto a través de la lluvia ácida

Mecanismo de la Acidificación

El SO₂ (dióxido de azufre) constituye la sustancia principal que causa la acidificación, aunque, no resulta ser la única sustancia que provoca ese tipo de impacto al medio ambiente. Otras sustancias, entre ellas el NO_x (óxido de nitrógeno), presentes en los subsistemas de producción son, también, potencialmente responsables de los efectos acidificantes.

El SO₂ es un ácido anhídrido y al absorber humedad de la atmósfera (H₂O), reacciona dando lugar a la creación del ácido sulfuroso (H₂SO₃); además, cuando los iones de hidrógeno

(2H^+) se disocian dan lugar a otro ácido anhídrico (SO_3^{2-}). Ese último también absorbe la humedad y cambia a un ácido sulfúrico (H_2SO_4) con gran poder corrosivo para lixiviar su catión SO_4^{2-} . La llamada “lluvia ácida” define claramente este fenómeno, pues al precipitarse sobre las superficies terrestres o acuáticas suelen dar lugar a reacciones que liberan los iones de hidrógeno y la posible lixiviación de cationes, a causa de la disminución de la cantidad de sustancias que neutralizan el H^+ , entonces aparece la alteración de la capacidad del medio para neutralizar los ácidos.

Del mismo modo, el NO_x (óxido de nitrógeno), que también es un ácido anhídrico tiene su efecto acidificante a partir de su reacción inicial en la troposfera con el ozono (O_3) convirtiéndose en ácido nítrico (HNO_3). El ion de hidrógeno (H^+) al disociarse del catión nitrato (NO_3^-) actúan aumentando, desencadenando el mecanismo de acidificación del suelo.

Otras sustancias como el amoníaco (NH_3), HF (ácido fluorhídrico) y HCl (ácido clorhídrico) contribuyen también a la acidificación, pero la falta de datos de la cantidad de iones lixiviales durante estas reacciones impiden la valoración de su importancia en esa categoría de impacto.

Fuentes emisoras de las sustancias de la “Acidificación”

La principal fuente de emisión del SO_2 corresponde al consumo de combustibles fósiles, dependiendo del contenido de azufre del combustible y de la cantidad del combustible quemado. Las centrales termoeléctricas que utilizan combustibles fósiles en la generación de electricidad también constituyen una fuente considerable de esas emisiones. Otras fuentes de emisiones provienen de los equipos mecánicos y vehículos de transportes que, asimismo, consumen combustible fósil. De hecho, esas emisiones suelen ser controladas mediante la reducción de las emisiones a la atmósfera con la instalación de sistemas de filtros en las instalaciones o vehículos que los utilizan.

Con respecto a las emisiones de NO_x , éstas son atribuidas exclusivamente a los procesos energéticos de los sistemas, y resultan, principalmente, de aquellos subsistemas que usan combustibles fósiles (hornos, maquinarias mecánicas y vehículos de transporte)

Además, en los procesos de producción de electricidad, de donde proviene parte del NO_x y SO_2 , hay que añadir las emisiones de otras sustancias potencialmente acidificantes como es el caso del amoníaco (NH_3), ácido fluorhídrico (HF) y ácido clorhídrico (HCl) en la matriz energética de la energía eléctrica.

Eutrofización

Las mismas emisiones de NO_x antes mencionadas también favorecen al enriquecimiento de nutrientes de las reservas acuáticas y suelos agrícolas. La elevación en el contenido de nitrógeno que resultan de la liberación del NO₃⁻ (nitrato) en los ecosistemas causan un desequilibrio que favorece el desarrollo, sin control, de algas en las reservas hidrológicas que terminan por disminuir la cantidad de oxígeno necesario para que otros seres vivos sobrevivan en aquel hábitat. Por su parte, en los sistemas agrícolas el enriquecimiento del suelo con nitrógeno provoca el desequilibrio de la carga de sales nutrientes y pone en peligro la subsistencia de determinadas especies vegetales.

Mecanismo de la Eutrofización

En cualquier ecosistema existen elementos que las plantas y organismos acuáticos (algas) necesitan para su anabolismo, entre los principales cabe destacar el carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O), aunque también son necesarios otros elementos como el nitrógeno (N) y el fósforo (P), en cantidades equilibradas. Asimismo también se requieren, aunque en menor cantidad, una larga lista de elementos como el potasio (K), magnesio (Mn), calcio (Ca), hierro (Fe), manganeso (Mg), plomo (Pb), silicio (Si) y boro (B). Aquí cabe añadir la luz solar que garantiza la energía necesaria para el proceso de la fotosíntesis y, consecuentemente, la vida de los seres vivos.

Con todo, las disociaciones que implican las emisiones de NO_x, al depositarse sobre las superficies terrestres o acuáticas suelen desencadenar reacciones con otros elementos químicos presentes en estos medios, y ello causa el desequilibrio de los ecosistemas receptores y resultando en impactos al entorno medioambiental.

Fuentes emisoras de sustancias que causan “eutrofización”

Con origen fundamentalmente en el tipo de combustible utilizado la producción de energía eléctrica, esas emisiones están asociadas directamente a los procesos energéticos empleados en los sistemas de producción.

c) Efecto local

Como ejemplo de las categorías de impactos de efecto local se presenta el mecanismo de impacto desencadenado a través del polvo. Este tipo de contaminante de la atmósfera conduce a una categoría conocida como *contaminación del aire por partículas*, que se manifiesta con más

intensidad en períodos de invierno, por lo tanto, se la conoce también como *contaminación de invierno*.

Contaminación del aire por partículas (contaminación de invierno)

Los efectos debidos a las emisiones de partículas sólidas (polvo) al aire resultan perjudiciales para la salud humana y otros seres vivos. A medida que estas partículas se mantienen en suspensión en el aire, y en función de su concentración, al ser respiradas por los seres vivos pueden causar daños irreversibles al sistema respiratorio. Entre las molestias registradas está la “silicosis”, que según informes médicos se produce en el individuo que aspira aire de atmósferas cargadas de partículas que contienen sílice (SiO_2). En los especímenes vegetales estas partículas se depositan sobre las hojas obstruyendo el sistema de respiración de las plantas.

El hecho de permanecer por poco tiempo en suspensión en el aire y depositarse rápidamente en el suelo, resulta de la gran influencia que la fuerza y dirección de las corrientes de aire, su principal dispersor, ejerce sobre las partículas finas de polvo, imprimiendo, además, el carácter local de este impacto, dado que estas partículas, difícilmente consiguen alejarse demasiado de la fuente emisora.

Fuentes emisoras de las sustancias de la Contaminación de invierno

Entre las emisiones que provocan este tipo de impacto aparece la sustancia de referencia SPM (del inglés Suspended Particle Materr), que es en realidad el polvo, el hollín u otras partículas finas que no captan los filtros y salen por las chimeneas o se originan durante la extracción de recursos (p.ej.: en las canteras). Todas las partículas en suspensión presentes el aire originadas de los sistemas de producción, tienen efectos impactante sobre o medio ambiente y lo mismo factor de caracterización que el polvo, o sea, el mismo grado de influencia y, por lo tanto, igual a 1.

2.4.3.2 - *Asignación de los resultados del análisis del inventario*

El segundo paso trazado en la metodología se conoce con el término de *Clasificación*. En esta, los resultados del inventario se asignan respectivamente a cada unas de las categorías de impactos previamente seleccionadas.

El procedimiento consiste en identificar y correlacionar todas las cargas ambientales a una o más categorías de impactos potenciales, es un procedimiento de rutina que se asigna a la totalidad de las cargas ambientales del sistema analizado. Entre los requisitos necesarios para tal procedimiento destaca el conocimiento del comportamiento de estas cargas medioambientales y

la actuación sobre los mecanismos medioambientales que éstas desencadenan. En general se utilizan modelos de referencia como los elaborados por CML [1992], Wenzel et al. [1997] y PRÉ Consultants [1999]

Es importante advertir que en algunos casos determinadas sustancias pueden actuar simultáneamente en más de una categoría de impacto. Por ejemplo, el dióxido de azufre, que contribuye a la *acidificación*, también contribuye a la *contaminación del aire por partículas*; En casos de esa naturaleza, mientras el factor de caracterización del modelo CML sea igual a 1, será necesario establecer criterios críticos para evitar la doble asignación. [CML, 1992]

2.4.3.3 - Cálculo de los indicadores de categoría

El último paso a seguir se conoce como *Caracterización*, el cual se lleva a cabo mediante la aplicación de los factores de caracterización a fin de establecer el perfil medioambiental del sistema estudiado. Según la metodología, después de clasificada o asignada todas las cargas ambientales del sistema a determinadas categorías de impacto, seleccionadas según los objetivos del estudio, será necesario realizar la cuantificación de la referida categoría. Así, asignados (fase de clasificación del ACV) las sustancias contaminantes a un determinado modelo de categoría de impacto, por ejemplo el GWP anteriormente mostrado, todas las sustancias que contribuyen a esta categoría serán reducidas a una única sustancia de referencia y que servirá de base de agregación de todos los resultados en esta categoría de impacto.

En consecuencia, el resultado de la caracterización es la expresión de contribución a determinada categoría de impacto que, basándose en la cantidad de emisiones de sustancias equivalentes para cada categoría de impacto, miden la magnitud del impacto a través del producto entre la carga ambiental y el factor de caracterización correspondiente en aquella categoría de impacto que se desea o fue escogida para evaluar. En la tabla 2.6, se muestra como ejemplo, algunas de las categorías de impacto y el indicador base utilizado en la misma. Así, si se está trabajando con el efecto invernadero, los diferentes gases que inciden en dicho efecto (CO_2 , N_2O , CH_4 y CFC's) se traducen al único indicador considerado en esta categoría, en este caso kilogramos de CO_2 equivalente. Lo mismo ocurre para las demás categorías de impacto consideradas con sus respectivos indicadores de categoría.

Categoría de impacto	Indicador de categoría de impacto
Efecto Invernadero	kg CO_2 equivalente
Acidificación	kg de SO_2 equivalente
Eutrofización	kg de PO_4 equivalente

Tabla 2.6 – Ejemplo de indicadores de categoría resultante [CML, 1992]

2.4.3.4 - Elementos opcionales e informaciones

Tras la última etapa que se realiza en el ACV, existen otros tres pasos considerados opcionales, todos ellos de igual importancia para el análisis final del perfil medioambiental del producto o proceso analizado.

Entre ellos, el primero es conocido como la etapa de Normalización. En esta fase se determina la magnitud de cada categoría de impacto caracterizada, teniendo en cuenta a un cierto indicador de referencia, cuyo ámbito es lo más adecuado para el tipo de análisis que se desea emprender.

Por ejemplo, si quisiéramos conocer la magnitud del impacto sobre la categoría del efecto invernadero que causa la producción de cierto material producido en España, podríamos hacerlo a tres niveles. Como se trata de una categoría de ámbito global, podríamos relacionar este impacto con la contribución para el efecto invernadero resultante de la actividad humana en España, relativas, además, a un determinado año; con respecto a los datos anuales relativos a Europa; o bien en el ámbito mundial.

Los datos de la normalización podrán servir de referencia según determinados criterios establecidos, donde los valores normalizados serán valorados según una ponderación establecida para atender objetivos o metas definidas por políticas medioambientales previamente establecidas, hasta que ocurra la reducción o total eliminación de estos efectos sobre el medio ambiente. Por ejemplo, los objetivos establecidos por los países miembros de la Comunidad Europea que, según el Protocolo de Kyoto (1987), asumieron el compromiso de reducir los gases del efecto invernadero, hasta el año 2010, en un 8% con respecto a los niveles de 1990.

2.4.5 - Interpretación de los resultados

El ACV se finaliza con el análisis de todos los datos finales con respecto a sus significados, incertidumbres y sensibilidad sobre los resultados parciales. Hay que tener en cuenta que la razón y los objetivos del ACV, seguramente necesita de una experta revisión de contenido científico, principalmente para aquellas categorías de impactos cuyos valores que son más relevantes, teniendo en cuenta las limitaciones aún existentes en la herramienta para evaluar sistema un tanto cuanto complejo. Esta revisión debe incluir todos los aspectos metodológicos adoptados - clasificación, caracterización, normalización, etc. -, y será de gran utilidad a la hora de interpretar los resultados.

Por lo tanto, en esta última fase del ACV, los resultados anteriores deben ser reunidos, estructurados y analizados. Aquí debe confeccionarse una estructura de análisis de los resultados,

con un análisis de sensibilidad e incertidumbres, para que el conjunto de informaciones posibilite generar un informe con las conclusiones y recomendaciones, que pueda dar respuestas a las cuestiones que anticipadamente fueron definidas en los objetivos y alcance del estudio, tal como puede verse en la figura 2.14.

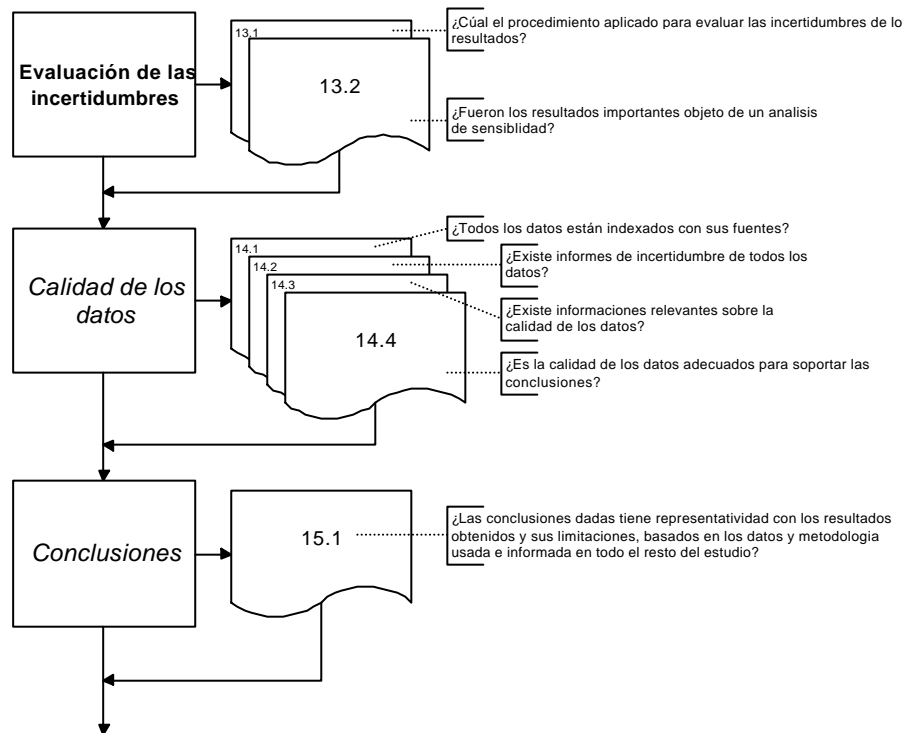


Figura 2.14 – Flujo con lista de chequeo de la 4ª fase del ACV

2.4.6 - Aspectos evolutivos del ACV

Wrisberg et al, [1997] en el documento final del LCANET (Programa estratégico de investigación para el análisis del ciclo de vida), reconoce que las acciones del SETAC y de la ISO contribuyeron a un rápido desarrollo del ACV, y refuerza así las significativas aportaciones hechas en este sentido por el grupo de trabajo europeo. Entretanto, reconoce que todavía existen barreras que debieran vencerse para ampliar el empleo de esa técnica. Entre ellas cita la necesidad de:

- Disminuir la complejidad del ACV. (Requiere un considerable nivel especializado de su procedimiento);

- Suplir la demanda con bases de datos, y disminuir el coste para su realización. (Reconocido como el factor que más contribuye a alejar el grupo de las medianas y pequeñas empresas que potencialmente serían usuarias de la metodología)

Además, llama la atención que ciertos aspectos metodológicos puedan poner en peligro la credibilidad del estudio. Propone la búsqueda de acciones motivadoras del uso del ACV para que se amplíe el número de usuarios, sea en la industria, organismos de políticas medioambientales, administración pública o grupos no gubernamentales. Además, propone que estas acciones contribuyan de forma positiva para una mejoría y armonización de la metodología, citando como ejemplo, la divulgación de un mayor número de estudios, principalmente aquellos de reconocido éxito.

Entre otras sugerencias para el desarrollo del ACV en Europa, el LCANET considera importante la propagación de argumentos para motivar el uso del ACV a otros países más industrializados, donde todavía existe poca conciencia medioambiental.

Todas estas cuestiones son el resultado de las primeras aplicaciones del ACV, en el momento en que surgieron dudas relacionadas con la validez y fiabilidad del método. Por ejemplo, cuando cierto producto presenta un perfil medioambiental inadecuado o diferente de aquello que intuitivamente se espera, es motivo de evidentes preocupaciones en el sector productivo. Tales preocupaciones están asociadas con la "imagen de la empresa" y sus relaciones de mercado. La solución para estos casos pasa porque se exijan definiciones más claras de los objetivos y responsabilidades en las divulgaciones de los resultados.

Entretanto hay que tener en cuenta que algunas definiciones básicas tienen fuertes influencias en las fases de evaluación. Lo importante es no olvidar el carácter interactivo del ACV, donde todas las definiciones y consideraciones iniciales, podrán ser cambiadas, adaptada o refinada a lo largo del estudio. Trinius [1999]

Por sus antecedentes, el ACV demuestra que la complejidad de la herramienta, por lo que respecta a los aspectos metodológicos, todavía sigue evolucionando. El carácter interactivo de la herramienta hace que el método tenga un relativo grado de flexibilidad y adaptación durante su aplicación como herramienta de gestión, apoyando a la toma de decisiones con respecto a temas medioambientales y animando a seguir esa línea de investigación.

2.4.7 – Soporte informático aplicado al ACV

Los pasos operativos para que se lleve a cabo el análisis de ciclo de vida de un sistema o producto, incluyen el manejo de gran cantidad de datos de los inventarios, seguidos de diversas

operaciones de cálculos que se aplican a los factores de caracterización, índices de categoría, etc., como se ha indicado en apartados anteriores. Estos aspectos serán más viables con el soporte de sistemas informáticos que faciliten las tareas a realizar. [Josa, et al., 1999a]

Si bien es cierto que desde buen inicio fueron desarrollados programas de ordenador para atender la necesidad específica de algunas organizaciones, en la actualidad existen diferentes aplicaciones disponibles en el ámbito comercial. Así pues, es oportuno señalar que algunos de estos programas están al alcance de usuarios de niveles avanzados (expertos en ACV); además, existen otros que procuran atender a la necesidad de usuarios con objetivos específicos (p.ej. proyectistas y arquitectos)

Por lo tanto, a la hora de decidir seleccionar alguno de estos programas, deben considerarse dos aspectos importantes:

- Inventarios que incorpora (específicamente en el ámbito en el que se quieren llevar a cabo los ACV's)
- Calidad en la gestión de datos, incluyendo en este concepto:
 - La facilidad en la introducción de los datos de entrada para los diferentes ACV's que se planteen;
 - La flexibilidad en el uso, actualización, sustitución, adición, etc. de datos de inventarios y, en especial, la posibilidad de añadir inventarios nuevos;
 - La fiabilidad en los cálculos realizados y en el seguimiento de los mismos, siendo en este punto de vital importancia la posibilidad y facilidad de conocer el origen de cualquier resultado (trazabilidad);
 - La realización de todas las fases de cálculo de un ACV; y,
 - El tipo de salida de resultados (tablas / gráficas) y su flexibilidad.

De acuerdo con lo anterior, la calidad de los inventarios y la flexibilidad de estas bases de datos marcan la diferencia con los programas existentes, al considerar que, en buena medida, la fidelidad de estos inventarios con el sistema o producto analizado influyen directamente en la calidad de los resultados finales del ACV [Trusty, 1999].

También es importante subrayar que la simplicidad de uso presentada por algunos programas es una ventaja considerable para el usuario, mientras que exija un conocimiento conveniente de la metodología del ACV's, porque de lo contrario puede llevarle a resultados y conclusiones erróneas por falta de capacidad crítica sobre el tema [Josa, et al.,1999a]

A continuación, en la tabla 2.7, se presenta el resumen de una lista de programas de ordenadores del ACV. La presentación enfatiza solamente programas de aplicación genérica, así como, a través de sus géneros, aquellos que son específicos para la construcción de base de datos o que sirven a otros fines, mientras que toman como base la estructura conceptual del análisis del ciclo de vida.

PROGRAMA	ORGANIZACIÓN	GENERO	PAIS DE ORIGEN
SimaPro 4.0	PRé Consultants	Análisis de inventarios y evaluación de impactos	Holanda
IVAM data base	PRé Consultants	Base de datos	Holanda
GaBi 3.0	Universidad de Stutgard	Análisis de inventarios y evaluación de impactos	Alemania
KCL-ECO	The Finnish Pulp and Paper Research institute	Análisis de inventarios	Finlandia
LCAiT	Chalmers Industriteknik	Análisis de inventarios	Suecia
PEMS	Pira International	Análisis de inventarios y evaluación de impactos	Reino Unido
PIA	PRé Consultants	Análisis de inventarios y evaluación de impactos	Holanda
TEAM™	Ecobalance, Inc	Análisis de inventarios	USA

Tabla 2.7 – Programas de ordenadores para el ACV de productos o sistemas genéricos

Sin embargo, la ausencia de trazabilidad de algunos productos de la construcción durante parte del ciclo de vida, representa un gran inconveniente en la aplicación de programas de ordenadores genéricos para realizar su ACV. Esto desencadenó la necesidad del desarrollo de sistemas más flexibles con inventarios apropiados para cubrir la amplia gama de materiales y procesos de la construcción. Cabe destacar que estos programas no siempre tratan específicamente de realizar el ACV de determinado producto o proceso y, por lo tanto, se debe averiguar su relación con el tema que se desea estudiar.

Estos programas comparten la facilidad de realizar las rutinas numéricas típicas de los sistemas de evaluación y, al mismo tiempo, atender objetivos específicos de determinados programas de investigación que están asociados al instituto o centro de excelencia donde se

desarrollaron. Por lo tanto, son pocos los que están disponibles comercialmente, bajo una marca registrada, tal y como puede verse en la tabla 2.8

Entre los programas comerciales, el Eco-Quantun es un ejemplo, desarrollado por la PRÉ Consultants, comparte la base de datos del IVAM – Data base, y fue montado en la raíz del SimaPro para atender la necesidad de parte del ecodiseño de la construcción. A su vez el ENVEST, EQUITY y ATHENA™ fueron desarrollados a raíz de programas de investigación específicos, por lo tanto, con sus objetivos asociados al proyecto de investigación que los originó, y hoy también ya están en el ámbito comercial. El punto de convergencia de todos estos programas resultan de la necesidad de ampliación de sus bases de datos.

PROGRAMA	ORGANIZACIÓN	OBJETO	PAIS DE ORIGEN
ATHENA™	ATHENA Sustainable Materials Institute	Materiales y sistemas constructivos	Canadá
BDA	ATHENA Sustainable Materials Institute	Base de datos	Canadá
EcoQuantun	PRÉ Consultants	Sistemas constructivos	Holanda
ENVEST®	BRE – British Research Establishment	Sistemas constructivos	Reino Unido
EQUITY	Centre Scientifique et Technique du Batiment	Sistemas constructivos	Francia
LCA-House	VTT – Building Technology	Sistemas constructivos	Finlandia

Tabla 2.8 – Programas de ordenadores que auxilian el ACV de productos de la construcción

2.5 - ACV DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

2.5.1 – Consideraciones generales

Los materiales de construcción se consideran de vital importancia para este sector. Técnicamente estos productos no evolucionan de la misma manera que los materiales primarios de otros sectores, como el electrónico o automovilístico. Las razones para este “freno”, posiblemente, estén centradas en factores históricos y culturales del sector. Estos factores se plasman en determinados puntos a través de aspectos relacionados con la tradición de uso o disponibilidad haciendo que su elección respete, en la mayoría de los casos, algunos de estos aspectos.

Presionados por la creciente demanda, consecuencia de los avances económicos y sociales contemporáneos, muchos de los materiales de construcción recibieron un impulso para traspasar

el umbral de materiales naturales y locales, y convertirse en productos industrializados y exportables, por lo tanto, bajo los mismos criterios de selección (técnicos, económicos y medioambientales) que son aplicables a los restantes productos y materiales de otros sectores.

Asimismo, todavía no existe una metodología universalmente aceptada, que de forma consensuada, inequívoca y global cuantifique todos estos criterios, del mismo modo que existe cuando se utilizan criterios técnicos o económicos del material, y poder así colaborar en el establecimiento de métodos de toma de decisión, por ejemplo, que utilicen como parámetros los múltiples criterios, entre otros el método de la lógica difusa [Ramírez, 2000].

La tabla 2.9 muestra algunos criterios medioambientales para acceder a una selección del material de construcción medioambientalmente correcto [Fábregas, et al., 1998].

CRITERIOS	JUSTIFICACIÓN
1. Recursos renovables	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Los materiales elaborados con materias primas y energías renovables o muy abundantes, son preferibles ante, que otros que utilizan fuentes convencionales o escasas (p.ej. combustibles fósiles, minerales escasos, etc.), debido al carácter preservante y efecto biodegradable de sus fuentes materiales;
2. Ahorro energético	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El balance energético del material, debe demostrar ser el producto con menor coste energético a lo largo de todo su ciclo de vida, principalmente cuando se compara con otro, bajo los mismos criterios;
3. Valorización de residuos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El uso de materiales elaborados con residuos, reutilización o reciclaje de subproductos de la construcción, frente a otros materiales con fuentes de materias primas convencionales deben ser potenciados;
4. Industrialización	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Los productos estándar montados industrialmente que disponen de un balance en su ciclo de vida racional, y principalmente, desde el punto de vista económico, son más favorables;
5. Tecnología “limpia”	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Todas las fuentes de materias primas y energías empleadas en la producción del material, tal como, la eficiencia del proceso productivo (extracción, transformación y acabados) deben asumir el carácter no contaminante;
6. Toxicidad	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La ausencia de efectos alérgicos, emisiones tóxicas, anormalidades electromagnéticas y minimización de la radioactividad natural constituyen un criterio básico para la selección del material;
7. Durabilidad	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Todas las informaciones acerca del valor funcional, durabilidad y bases de mantenimiento para que este producto resista adecuadamente bajo las condiciones de uso, durante toda su vida útil, son valores fundamentales como criterio selectivo.

Tabla 2.9 – Criterios aplicables para definir el material medioambientalmente correcto

Por otro lado, el hecho de no existir ninguna metodología para apoyar la selección, en la práctica se toma partido de otras metodologías (véase apartado 2.3) que se forma consensuada sirven para evaluar cuantitativamente parte de estos aspectos. Como ejemplo, el análisis del ciclo de vida, que actualmente viene siendo utilizado principalmente por las organizaciones para

defender y promover sus productos ante la competencia y las nuevas normativas. [Cembureau, 1995; Onabolu, 2000].

Estos estudios, que principalmente actúan ampliando las bases de datos disponibles, son necesarios para perfilar correctamente estos materiales a través de la cuantificación de todos los criterios involucrados en el ciclo de vida del producto. En este sentido varios autores [Fábregas, et al., 1998; Trinius, 1999; Trusty et al., 2000; Onabolu, 2000] indican que la calidad de los inventarios es responsable directa de la calidad de la evaluación medioambiental de los productos de la construcción.

Asimismo, a pesar de que algunos sectores divulguen el perfil medioambiental de sus productos, como es el caso del acero, aluminio, plástico, madera, cemento y hormigón, es de interés que estos datos traspasen los objetivos actuales de la estrategia de mercado, pasando al dominio público, para permitir que su uso apoye el desarrollo o mejoría medioambiental de estos materiales. En la tabla 2.10 se muestra algunas direcciones donde pueden consultarse datos o políticas medioambientales de sectores productivos con respecto a estos materiales de construcción.

Producto	Promotor	Dirección electrónica
<i>Acero</i>	IISI y British Steel	http://www.britishsteel.co.uk
<i>Aluminio</i>	Asociación Mundial del Aluminio	http://www.world-aluminium.org
<i>Madera</i>	Federación del comercio de maderas	http://www.ttf.co.uk
<i>Plásticos</i>	APME	http://www.apme.org
<i>Cemento</i>	CEMBUREAU	http://www.cembureau.be

Tabla 2.10 – Materiales de construcción donde ya se aplican estudios de ACV

2.5.2 - El perfil medioambiental de materiales y productos derivados del cemento

Los hormigones, morteros y pastas son los materiales derivados del cemento que se emplean en la producción de componentes y elementos usados en la construcción de edificios u obra civil. El hormigón, debido a sus conocidas propiedades físico-mecánicas, y de un comportamiento bajo determinadas condiciones ambientales es un material de gran versatilidad, que se emplea, principalmente, para producir componentes y elementos constructivos, mientras que los morteros y pastas, por los mismos motivos, son útiles en la composición de hormigones u otras aplicaciones.

En razón a la versatilidad citada, a la hora de escoger qué material es el más adecuado para solucionar una necesidad específica, los hormigones suelen ser más adecuados con relación a otros materiales (p.ej. acero o madera), bajo criterios selectivos basados tanto en aspectos técnicos o económicos como, más recientemente, criterios de selección medioambientales.

Asimismo, como cualquier otro producto, los hormigones presentan a lo largo de su ciclo de vida varios aspectos medioambientales cuantificables a través de metodologías, como el análisis del ciclo de vida (ACV), que permite trazar su perfil medioambiental. No obstante, se sabe que para elegir el material bajo estos criterios, todavía, no existen procedimientos consolidados, por lo tanto, se carece de un profundo conocimiento sobre este tema.

Sin embargo, el comportamiento del hormigón a lo largo de todo su ciclo de vida es variable, motivado por algunos factores intrínsecos al propio producto y que, consecuentemente, quedan reflejados a través de las variabilidades de su perfil medioambiental. Por ejemplo,

- En su composición, mezcla diferentes materiales (cemento, áridos, agua y adiciones), en cantidades variables de acuerdo con ciertas propiedades específicas, por lo tanto, su perfil medioambiental varía en función de los materiales que lo componen;
- Las condiciones de producción, transporte, puesta en obra y acabados difieren a la hora de atender condiciones específicas de uso. Por lo tanto, consumen diferentes cantidades de energía (electricidad y combustibles), añadiendo más variables y, en algunos casos, el perfil medioambiental de otros materiales de su constitución (p.ej. el acero en los hormigones armados o pretensados);
- En general necesitan poco o ninguno sistema de mantenimiento pero, cuando necesitan de actuaciones de rehabilitación, pueden consumir cantidades significativas de material y energía;
- A la hora de demoler, el re-uso y el reciclado son procesos todavía no consolidados en el sector de la construcción, y por este motivo existe un bajo índice de aprovechamiento y reflejos consecuentes en el ahorro de recursos materiales y energéticos. Además, cuando son desechados, en general, pueden generar significativas cantidades (volumen) de residuos con sus consecuentes costes medioambientales.

Evidentemente en el momento que un producto se muestra con un perfil medioambiental más o menos complejo, como es el caso de hormigón, es metodológicamente recomendable elegir fases o componentes de su ciclo de vida, cuyas repercusiones sean las más significativas sobre su perfil; avanzar en este conocimiento hasta el dominio de estos aspectos, para

posteriormente poder actuar sobre todo el ciclo, mejorando o controlando su relación con el entorno ambiental [Trinius, 1999]

La figura 2.15 muestra, esquemáticamente, el ciclo de vida de un elemento prefabricado de hormigón, indicando puntualmente algunas de las etapas, anteriormente descritas que relatan algunos aspectos medioambientales de estos productos.

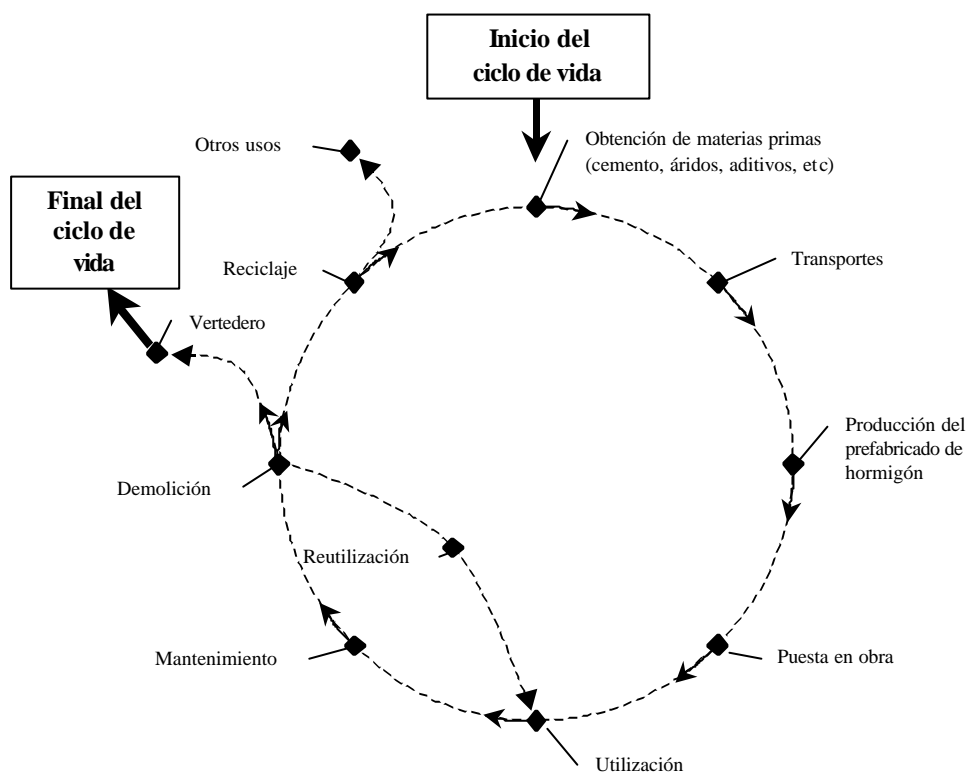


Figura 2.15 - Ciclo de vida de un prefabricado de hormigón [Josa, et al., 1997]

En este sentido, diversas investigaciones realizadas con el objetivo de analizar el ciclo de vida del hormigón apuntan a la producción de cemento como fuente principal de consumo de energía y emisiones a la atmósfera que influyen significativamente en el perfil medioambiental del hormigón. [Vold y Rønning, 1995; Nisbet y Van Uem, 1997; Glavind y Munich-Petersen, 2000].

Corroborando los estudios anteriormente referidos, los datos obtenidos por Onabolu y Rånan [2000] al trazar el perfil medioambiental de la producción de un elemento prefabricado de hormigón (tejas de hormigón), apuntan que del total, a la producción de cemento le corresponde el 47% del consumo de energía obtenida a partir de combustibles fósiles; el 48% del consumo de energía eléctrica; el 62% de las emisiones de CO₂ y el 51% de las emisiones de NO_x a la atmósfera, según se aprecia en la figura 2.16.

Estos datos presentados por Onabolu y Rånan, [2000], subrayan el papel predominante del cemento con respecto a los demás materiales y procesos en el trazado del perfil medioambiental del hormigón estudiado. Además, indican que las cargas medioambientales asociadas a la producción de cemento y transferidas al perfil medioambiental del producto, no puede ser variadas por parte del consumidor, en el cemento en sí mismo, aunque sí a través de la dosificación de cemento en el hormigón, o bien, a través del uso de cementos con perfil medioambiental optimizado por parte del productor, conforme sugiere Glavind y Munich-Petersen, [2000]

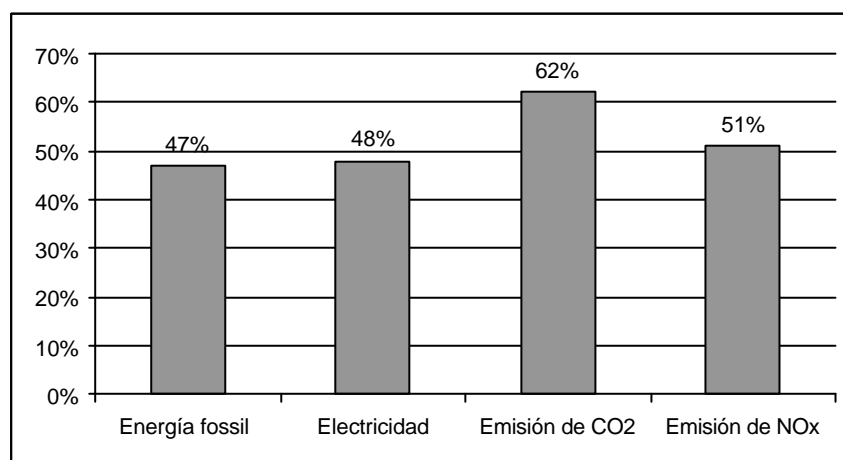


Figura 2.16 – Participación de la producción del cemento en el ciclo de vida de un prefabricado de hormigón [Onabolu y Rånan, 2000]

2.5.3 - El perfil medioambiental del cemento

Clasificado como producto básico del sector constructivo, el cemento resulta de un proceso industrial de transformación mineral, donde el resultado de la calcinación de mezclas de materiales pétreos (calizas, margas, arcillas, etc.) producen un material primario denominado de clinker. Seguidamente el clinker es molido, en procesos complementarios, juntamente con una

fracción de yeso y da lugar a un material con propiedades aglomerantes denominado “cemento portland”.

Considerada una industria de tecnología universal, el sistema de producción de cemento consume cantidades significativas de combustible fósil como principal fuente de energía térmica, y, de forma secundaria, para movilizar los equipos de los subsistemas soportes tales como: máquinas excavadoras, vehículos de transporte, grupos generadores de electricidad, etc. También consume electricidad para la puesta en marcha de los demás conjuntos electromecánicos complementarios (básculas, moliendas, esteras transportadoras, etc.). Estos elevados consumos, con consecuencias medioambientales, ha movido al sector del cemento a realizar planes ecológicos vinculados a la reducción y/o economía de estos recursos. [Cembureau, 1999b]

Las cargas ambientales resultantes de estos consumos energéticos se presentan, principalmente, en forma de gases emitidos a la atmósfera, como por ejemplo, dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógenos (NO_x) y dióxido de azufre (SO_2) con los efectos correspondientes en el medio ambiente (véase subapartado 2.4.3.1).

Al mismo tiempo, se originan otros efectos, tanto los inherente al proceso de producción, como por ejemplo, las reacciones químicas de descarbonatación de la caliza en el horno de producción de clinker, proceso en el que se genera CO_2 , y en distinta intensidad, otras sustancias como por ejemplo el SO_2 , partículas sólidas (polvo), algunos metales pesados, compuestos orgánicos volátiles, etc. [Vold y Rønning, 1995; Nisbet y Van Uem, 1997; Glavind y Munich-Petersen, 2000].

Es sabido que la contribución de la industria cementera en las emisiones del dióxido de carbono (CO_2) es significativa, tanto por las reacciones de descarbonatación como por el uso de combustibles fósiles situándola en primer lugar de las fuentes no energéticas [Houghton, et al., 1996]. En valores absolutos, sin embargo, esta contribución a las emisiones de CO_2 , en el ámbito mundial y por todos los sectores se puede situar en el entorno del 7% del total [CIDIAC, 2000].

La herramienta del análisis del ciclo de vida posibilita evaluar estas intervenciones medioambientales del cemento, suministrando la información necesaria para que los fabricantes puedan intervenir controlando, disminuyendo o eliminando determinados problemas. [Vold y Rønning, 1995; Schuurmans, et al., 1996; Nisbet y Van Geem, 1997; PRé-Consultants, 1997]

Si aún no existen registros de una aplicación efectiva de los resultados del análisis del ciclo de vida sobre la producción de cemento, si que, se dispone de algunos inventarios de estas iniciativas, que sumados a otros que integran el programa informático SimaPro 4.0, permite, en principio, realizar el análisis del ciclo de vida de cualquier producto de hormigón.

Por lo tanto, ante la oportunidad de utilizar estos resultados, el grupo de ACV de la UPC adoptó como punto de partida el desarrollo de una línea de investigación sobre el perfil medio ambiental de productos derivados del cemento, utilizando como apoyo la herramienta del análisis de ciclo de vida con la intención de realizar estudios de alternativas sobre elementos estructurales en hormigón para la cobertura de una nave industrial.

Para este caso, el criterio selectivo sería para aquél que presentara el mejor perfil medioambiental, analizado entre diferentes alternativas propuestas por fabricantes de estos tipos de prefabricados. Entretanto, iniciados los estudios, los resultados demostraron la inviabilidad del uso de estos inventarios por falta de representatividad. Es decir, la trazabilidad y consistencia presentada por estos inventarios eran dudosas, de difícil interpretación y conllevará a imperfecciones en los resultados finales y, en consecuencia, dudas sobre el proceso de decisión.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE LOS INVENTARIOS – DATOS DE ENTRADAS Y SALIDAS

3.1 – ANTECEDENTES

Como es conocido, para estudiar la incidencia medioambiental en la obtención de productos existen diversos métodos, entre los cuales está el *Análisis del Ciclo de Vida (ACV)*. Para llevar a cabo un ACV es necesario disponer de bases de datos (inventarios) que incluyan un número elevado de aspectos medioambientales de los productos (materias primas) y procesos de las diferentes etapas del ciclo de vida analizado.

Los inventarios existentes (independientemente de la herramienta numérica), en general, abarcan productos industriales muy amplios y son escasos los correspondientes a productos típicos de la construcción y, entre ellos, el cemento. Ello conduce, frecuentemente, a una cierta imprecisión o dudas sobre las fases que alcanza los inventarios, por lo que es necesario realizar un análisis de fiabilidad de los mismos. En el ámbito del cemento los inventarios de los que se dispone corresponden a los aportados por SimaPro [PRé Consultants, 1997] y por CEMBUREAU [INTRON, 1997].

Por otro lado, para la cuantificación numérica de un ACV existen diversas herramientas numéricas [Menke, D. et al, 1996]. En el presente trabajo se utiliza la propuesta por el SimaPro por diversas razones de flexibilidad a incorporar nuevos planteamientos, amplitud en las bases de inventarios asociadas, extensión de uso en el ámbito europeo, etc. [Josa, et al., 1999].

En los estudios de fiabilidad de los inventarios que se requieren, es preciso elegir un proceso simple para no introducir, desde el punto de vista de método científico, más variables que distorsionen el análisis. Por ello, se toma como proceso de referencia, la fabricación de un (1) kilogramo de cemento, realizando un ACV de esta unidad de producto.

3.2 – OBJETIVOS

El objetivo principal de este estudio es hacer un análisis de los inventarios de producción de distintos cementos fabricados en Europa y de la fiabilidad de los mismos, y que están disponibles públicamente por el grupo de estudio de ACV de la UPC. Estos inventarios corresponden a los aportados por SimaPro (5 cementos) y por Cembureau (11 cementos).

Como objetivos específicos del trabajo se persiguen los siguientes:

- Analizar la estructura de los inventarios existentes, incidiendo en los puntos fuertes y débiles de los mismos.
- Estudiar la influencia de diversas variables de los inventarios según la procedencia y tipo de cemento.
- Acotar órdenes de magnitud de las cargas ambientales transmitidas por las entradas (*recursos/material*) y salidas (*emisiones/residuos*) de los sistemas de producción de los cementos estudiados.
- Definir indicadores que permitan identificar los factores principales de los potenciales impactos medioambientales causados por estas cargas.
- Sentar las bases para la obtención de los inventarios de los cementos españoles, dentro del contexto de trabajo realizado por el grupo de ACV de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona y el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).

3.3 – ESTRUCTURACIÓN DE LOS INVENTARIOS DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DEL CEMENTO

Dentro del Sector de la Construcción existen, en general, pocos inventarios para utilizar en estudios de Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Además los grupos o subsectores, frecuentemente, hacen políticas de acceso restringido a esa información por lo que significa de dar argumentos a la competencia. Esta suele ser la situación de los países más avanzados en este campo, ya que en otros muchos, entre los que se encuentra España, no suele disponer de inventarios estructurados, por lo que hay que trabajar con referencias (inventarios) externas, que en algunos casos pueden no ser extrapolables.

Dentro del campo del cemento, se ha tenido acceso a los inventarios aportados por *SimaPro* [Pré Consultants, 1997] y el *Cembureau* [INTRON, 1997]. En el primer caso estos inventarios se engloban dentro de la documentación suministrada con el programa *SimaPro* y corresponden a ejemplos de cementos tipo (I, II, III y IV), dentro de una estructura más general en la que se incluyen materiales muy diversos. Por su parte el inventario correspondiente a *Cembureau* es un inventario específico del sector, si bien obtenido a partir de superposición de aportaciones individuales (bibliográficas, etc.), no-fruto de una campaña estructurada dentro del sector, por lo que se evidencia una falta de homogeneidad en los datos y en el tratamiento.

En la tabla 3.1 se presentan los cementos que incluyen los inventarios utilizados de *SimaPro* o *Cembureau*. En la misma se refleja la nomenclatura utilizada en el propio inventario así como la clasificación del tipo de cemento de acuerdo con la nomenclatura propuesta por la ENV-197-1. Esta clasificación se ha hecho con objeto de facilitar la identificación, habiendo sido realizada por nosotros a partir de los datos aportados en el inventario de cada cemento. Asimismo se presenta el origen del cemento, con el fin de visualizar el ámbito geográfico de origen.

En la citada tabla puede verse que, mientras los inventarios del *SimaPro* toman principalmente un cemento de cada tipo, en el inventario del *Cembureau* existe una muestra más amplia que permite comparar cementos del mismo tipo, sí bien de distinto origen. Con relación al origen hay que señalar, que algunos de los inventarios corresponden a los datos de un cemento y una planta (por ejemplo el Cement N de la planta de Skövde en Suecia), mientras que otros representan a un país (por ejemplo, el Portlandcement A de Austria).

Por otro lado, a manera de ejemplo de cómo se dan los inventarios citados, en el Anejo 2 se presentan las salidas impresas de las fichas correspondientes al cemento denominado Cement Portland I (del inventario dado por *SimaPro*) y al cemento (del inventario dado por *Cembureau*). En el mismo puede verse que el inventario del *Cembureau* incluye una representación gráfica de las etapas que se incluyen en el sistema correspondiente a 1 kg de cemento, lo cual facilita el

entendimiento de cuales son los límites del sistema. Por su parte, los cementos del inventario de SimaPro, esa representación gráfica de los límites hay que ser construida a partir de la información del texto, lo cual puede aumentar la probabilidad de error en entiendo-lo.

Fuente	Nomenclatura	Clasificación	Clinker (%)	Origen
SimaPro	Cement Portland I	Tipo I - Portland cement	95-100	Holanda
	Cement Portland	Tipo II / A-S - Portland slag cement	80-94	Holanda
	Blastfurnace slag cement	Tipo III / B - Blastfurnace cement	20-34	Holanda
	Cement Hoogoven I	Tipo III / B - Blastfurnace cement	20-34	Holanda
	Portlandashcement	Tipo IV / B - Pozzolanic cement	45-64	Holanda
Cembureau	Cement CH	Tipo I - Portland cement	95-100	Suiza
	Cement N	Tipo I - Portland cement	95-100	Suecia
	Portlandcement NL1	Tipo I - Portland cement	95-100	Holanda
	Cement S	Tipo I - Portland cement	95-100	Suecia
	Cement SF1	Tipo I - Portland cement	95-100	Finlandia
	Cement SF2	Tipo I - Portland cement	95-100	Países Nórdicos
	Portlandcement A	Tipo II / A-S- Portland slag cement	80-94	Austria
	Portlandcement NL2	Tipo II / A-S- Portland slag cement	80-94	Holanda
	Portlandcement NL3	Tipo II / B-S- Portland slag cement	65-79	Holanda
	Blastfurnace slag cement NL1	Tipo III / B - Blastfurnace cement	20-34	Holanda
	Blastfurnace slag cement NL2	Tipo III / B - Blastfurnace cement	20-34	Holanda

Tabla 3.1 – Inventarios de los cementos (SimaPro y Cembureau) utilizados

Respecto al tipo de cemento cabe destacar que prácticamente se dispone de, al menos, un caso de cada uno de los cementos tipo más usuales. Ahora bien, hay que señalar que en la clasificación realizada para situarlos de acuerdo a la ENV-197-1 se han encontrado ciertas dificultades. Para situarlos, a partir de los datos de inventario de 1 kg. de cemento, conocidas las cantidades de clinker y adiciones (excluido el yeso) que incorpora, se determinaba los porcentajes de cada una de ellas respecto al total.

Otro aspecto a reseñar es que no siempre se conocía el contenido de clinker de forma directa, en cuyo caso, se determinaba restando de la masa de cemento el contenido de adiciones más el yeso (en el caso de no existir adiciones se consideraba el clinker como 100%). En otro caso, donde no se dispone de la información acerca de las cantidades del clinker, adiciones o yeso, por defecto, se estimaba la cantidad de clinker en masa de 0,95 kg por kg de cemento, o sea 100%. De lo anterior se concluye ciertas dificultades en la estructuración de la información aportada en los inventarios.

Otro aspecto destacable que puede verse en la citada tabla 3.1 es la procedencia de los inventarios. Así prácticamente todos se sitúan en países tecnológica y mediambientalmente muy avanzados (de los dieciséis (16) inventarios disponibles: diez (10) son de origen holandés, cuatro (4) de origen nórdico y dos (2) de centro-europa).

Otros datos contrastan con los correspondientes a la producción de cemento en Europa. Como puede verse en la tabla 3.2, la cual presenta dichos datos aportados por OFICEMEN [1997] los países anteriormente citado vienen a representar menos del 15% de la producción de cemento de la Unión Europea, en el año de 1997. Ello puede reflejar, por un lado, que ante una mayor sensibilización social, los gobiernos dictan normas más estricta o bien los colectivos empresariales están más en línea con la preocupación social. Por otro lado, esta situación puede ser reflejo de una falta de transparencia en los datos disponibles, los cuales (en el caso de disponerse) sólo son de uso interno de las fábricas o, como máximo, del sector.

Países	Producción en la EU (año 1997)	
	(miles de toneladas)	(%)
Alemania	31.228	18
Austria	3.810	02
Benelux	12.402	07
España	29.693	17
Francia	19.743	11
Grecia	14.400	08
Italia	34.509	20
Reino Unido	12.638	07
Resto	16.950	10
Total UE	175.373	100

Tabla 3.2 - Producción de cemento en la Unión Europea (año 1997)

En cualquier caso, la tendencia de futuro parece apuntar en la dirección de realizar los inventarios de los cementos en todos lo países a medida que la sensibilización medioambiental crece y, consecuentemente, la presión social. De esta tendencia no deben excluirse los fabricantes españoles y los resultados de este trabajo pueden ser un paso en esta dirección.

Por ello se requiere incidir en detalle en el conocimiento de los datos de entrada y salida de cada uno de los inventarios con el fin de conocer las etapas que incluye cada inventario y analizar los datos de entrada y salida de los inventarios utilizados, identificando los parámetros principales de estudio, para su posterior incorporación en el ACV de 1 kg de cemento.

3.4 - ANÁLISIS DE LOS DATOS DE ENTRADA

3.4.1 - Estructura de los datos de entrada

El sistema denominado *Producción de 1 kg de cemento* (como el de cualquier otro producto) se puede desglosar en otros subsistemas. La estructuración que se refleja en los inventarios utilizados es la de un único sistema (Cembureau) o bien, según SimaPro, la división en los dos subsistemas siguientes:

- Producción del clinker + Producción del cemento. Tratamiento separado (SimaPro)
- Producción del cemento en un único sistema. Tratamiento conjunto (Cembureau)

La existencia de sistemas muy globales (tratamiento conjunto) suele presentar el inconveniente de la falta de visualización de los datos de las etapas intermedias, aparte de la falta de ajuste a las características específicas de cada fábrica o de cada tipo de cemento, que podría resolverse con un tratamiento separativo de subsistemas.

En este apartado se estudian las entradas y salidas, así como los comentarios y observaciones existentes, dejando para el siguiente capítulo el análisis de los resultados del ACV a través de los impactos referidos.

Una primera dificultad del análisis radica en las distintas formas de presentación de los datos, entre los dos grupos de inventarios compilados. Así los inventarios del SimaPro están estructurados en dos subsistemas (producción del clinker y producción del cemento a partir del clinker), mientras que los inventarios del Cembureau, a excepción del inventario correspondiente al cemento *SF2*, están todos los datos reunidos en un único sistema (producción del cemento).

3.4.2 - Los datos de entrada

3.4.2.1 - El consumo de materias primas

En la tabla 3.3 se presenta un resumen de los datos del consumo de materiales utilizados en la fabricación de 1 kg de cemento, tal y como se reflejan en las fichas de cada inventario dadas en el anejo 2. En la citada tabla puede observarse que los inventarios de Cembureau no señalan la cantidad de clinker (de acuerdo con el planteamiento conjunto realizado), si bien la misma podría obtenerse por diferencia con otros componentes a partir de la unidad. Ahora bien, este planteamiento no es el seguido en los inventarios de SimaPro (tratamiento separativo), en los cuales el yeso se suma a partir de la unidad de los otros componentes (excepto en el Cement Portland I).

Además, en el caso del Portland Cement (II/A-S) la suma de los componentes es claramente superior a la unidad, lo cual debe reflejar la existencia de algún error (al cual no hemos tenido acceso a pesar de contactar directamente con los proveedores de SimaPro). Así pues, una primera conclusión de estos datos es que los mismos vienen influenciados por la fuente de procedencia. Además parece que existen errores numéricos en algunos de ellos.

En ella puede verse, aparte de la lógica dispersión correspondiente al tipo de cemento, la existencia de límites diferentes del sistema. Así algunos incorporan los explosivos utilizados en las canteras en la extracción de las rocas (Portlandcement A y Cement S), mientras que los otros no inciden en ese término. Asimismo, puede observarse esa dispersión en la inclusión o no del consumo de agua utilizada en el proceso.

Un aspecto interesante a reseñar es el orden de magnitud del consumo de caliza, el cual se sitúa en el entorno de 1,60 kg de caliza (y/o marga) / kg de cemento (en los cementos tipo I) y lógicamente menor en los otros tipos. Este factor es importante, dado que la emisión de CO₂ está influenciada principalmente por la cantidad de caliza y su transformación en la fabricación del clinker.

Tipo	Nomenclatura Original	Consumo de materias primas (kg)										
		Producción del clinker							Producción del cemento			
		Agua	Caliza	Marga	Arcilla	Pizarra	Óxidos férricos	Otras	Clinker	Escorias	Cenizas	Yeso
SimaPro	Cement Portland I	--	--	1,600	--	--	--	0,270	0,940	--	--	0,060
	Cement Portland	--	--	1,610	0,057	0,047	0,019	--	0,950	0,109	0,09	0,050
	Cement Hoogoven I	--	--	0,510	--	--	--	0,066	0,300	0,640	--	0,060
	Blastfurnace slag cement	--	--	0,425	0,015	0,012	0,005	--	0,250	0,729	0,024	0,050
	Portlandashcement	--	--	1,190	0,042	0,035	0,014	--	0,700	0,081	0,317	0,050
Cembureau	Cement CH	--	1,150	0,346	--	--	--	--	--	--	--	0,030
	Cement N	--	1,640	--	--	--	--	--	--	--	--	0,050
	Portlandcement NL1	1,410	1,600	--	--	--	--	--	--	--	--	0,060
	Cement S*	--	1,360	--	--	0,046	0,009	--	--	--	--	0,046
	Cement SF1	--	1,200	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Cement SF2	--	1,550	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Portlandcement A*	0,190	1,200	--	--	--	--	0,017	--	0,122	0,027	0,064
	Portlandcement NL2	1,071	--	1,045	0,028	0,066	0,019	0,047	--	0,095	0,076	0,050
	Portlandcement NL3	1,325	--	1,316	0,056	0,047	0,014	--	--	0,108	0,089	0,060
	Blastfurnace slag cement NL1	0,532	--	0,287	0,007	0,017	0,005	0,025	--	0,700	0,020	0,050
	Blastfurnace slag cement NL2	0,423	--	0,420	0,018	0,015	0,004	--	--	0,675	0,285	0,060

*Consideran los explosivos utilizados en la cantera (0,00170 y 0,00272 kg, respectivamente)

Tabla 3.3 - Consumo de materias primas en la producción de 1 kg de cemento

3.4.2.2 - El consumo de energía

El estudio de la energía consumida responde a que tal como señala la ISO 14.042:2000, en su apartado 5.3 se recomienda elegir uno de los parámetros más relevantes para el chequeo de fiabilidad de los inventarios empleados en el ACV de un producto o proceso. Por ello en la tabla 3.4 se presenta el consumo de energía (en MJ) requerido, asimismo, para la fabricación de 1 kg de cemento, para todos los inventarios y tipos de cementos. La energía total utilizada se desglosa en eléctrica y térmica, tal como se desprende de la información aportada por los inventarios (Anejo 2).

Tipo	Nomenclatura	Clinker		Cemento		Suma
		térmica	electricidad	térmica	electricidad	
I	Cement Portland I	3,380 (74%)	0,196 (4%)	0,846 (19%)	0,122 (3%)	4,544 (100%)
	Cement CH	-	-	2,980 (84%)	0,557 (16%)	3,537 (100%)
	Cement N	-	-	3,850 (87%)	0,557 (13%)	4,407 (100%)
	Portlandcement NL1	3,380 (92%)	0,196 (5%)	-	0,122 (3%)	3,698 (100%)
	Cement S	-	-	4,070 (90%)	0,470 (10%)	4,540 (100%)
	Cement SF1	-	-	4,900 (92%)	0,450 (8%)	5,350 (100%)
	Cement SF2	3,770 (91%)	0,136 (3%)	0,029 (1%)	0,189 (5%)	4,124 (100%)
II	Cement Portland	3,380 (92%)	0,134 (4%)	0,032 (0%)	0,146 (4%)	3,692 (100%)
	Portlandcement A	-	-	2,810 (88%)	0,382 (12%)	3,192 (100%)
	Portlandcement NL2	-	-	2,640 (96%)	0,116 (4%)	2,756 (100%)
	Portlandcement NL3	-	-	3,380 (91%)	0,318 (9%)	3,698 (100%)
III	Cement Hoogoven I	1,080 (43%)	0,063 (2%)	1,080 (43%)	0,292 (12%)	2,515 (100%)
	Blastfurnace slag cement	0,881 (55%)	0,035 (2%)	0,120 (8%)	0,551 (35%)	1,587 (100%)
	Blastfurnace slag cement NL1	-	-	0,680 (70%)	0,287 (30%)	0,967 (100%)
	Blastfurnace slag cement NL2	-	-	1,080 (75%)	0,354 (25%)	1,434 (100%)
IV	Portlandashcement	2,490 (89%)	0,099 (3%)	0,042 (1%)	0,194 (7%)	2,825 (100%)

Tabla 3.4 - Consumo de energía (en MJ) en la producción de 1 kg de cemento (electricidad y térmica)

En la energía eléctrica suelen incluir la utilizada en las instalaciones provenientes de red externa. Por ello, dependiente del país de origen, esa energía suele representarse por porcentajes de origen de la misma (nuclear, hidroeléctrica, centrales térmicas, solar, eólica, mareas, otras). Las emisiones en la obtención de estas energías no tienen porqué estar en el entorno de la fábrica de cemento, sino que usualmente estarán lejos de las mismas.

La energía térmica corresponde principalmente a la utilizada en el horno de fabricación del clinker y suele utilizar recursos fósiles no renovables (fuel, carbón, etc). En la actualidad, la obtención de los mismos suele ser lejana a la fábrica (por ejemplo, carbón de Australia o Sudáfrica) si bien las emisiones de la fabricación del clinker repercuten en un ámbito local, regional y global.

En la citada tabla puede observarse que desde el punto de vista energético (electricidad + energía térmica), el mayor consumo corresponde a la producción del clinker alcanzando casi el 90% del total de la energía consumida en el sistema. Consecuentemente, los cementos que utilizan menores cantidades de clinker consumen menos energía como era de esperar y es bien conocido. La distribución del consumo energético entre electricidad y energía térmica es aleatorio, sin tener una solución única, parece que depende del tipo de fábrica.

Por otro lado, para el conjunto de los cementos tipo I el valor medio de la energía consumida por kg de cemento es de 4,31 MJ, lo cual está en orden de magnitud con los valores expresados por Cembureau. Así en la figura 3.1. se muestra el consumo medio de energía por tonelada de clinker, el cual se sitúa en 1995 sobre 3,7 MJ/kg de clinker, valor este al que habría que sumar la energía correspondiente en la producción del cemento, que tal como se ha dicho para un cemento tipo I está entre el 10% y el 15% de la anterior, lo que conduciría al valor medio antes citado (4,31 MJ/kg).

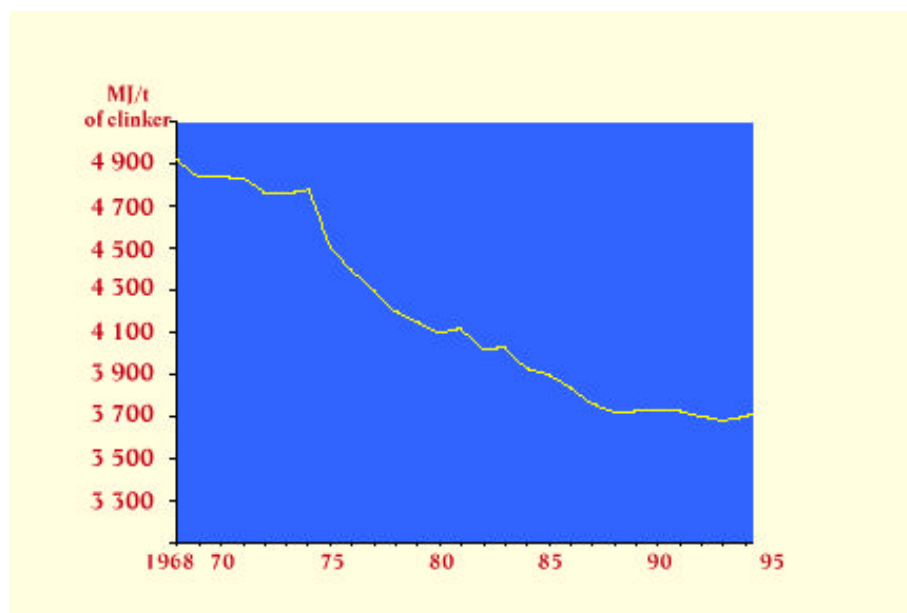


Figura 3.1- Evolución del consumo medio de energía para la producción del clinker (Fuente: Cembureau)

En esta figura, puede verse asimismo, que la reducción importante del consumo de energía se produce a partir del año 1975. Ello puede ser un interesante reflejo de la crisis del petróleo del año 1973 y la adaptación de las fábricas y sus equipamientos a esa circunstancia. Si esta hipótesis es cierta habría que reflexionar sobre la incidencia del incremento de los costes energéticos, especialmente, del petróleo y de las posibilidades de reducir aún más este consumo.

Por otro lado, en la tabla 3.5 se hace una comparación del consumo de energía para la obtención de 1 kg de otros materiales utilizados en la construcción (acero, armadura, aluminio). Asimismo se introduce la relación energía / peso específico. Con ello se pretende dar una idea de rendimientos energéticos de estos materiales y razones de la aplicación de unos y otros.

Material	Energía (MJ / kg)	Energía / Peso específico (MJ / m3)
Cemento	4,27	0,0013
Acero (0 % reciclado)	29,2	0,0037
Acero (23 % reciclado)	24,8	0,0032
Acero (50% reciclado)	14,6	0,0018
Aluminio	54,0	0,0199

Tabla 3.5 - Consumo medio energético de materiales usuales en la construcción

En ella puede verse que el consumo energético por kg del cemento es el menor, sin embargo cuando se refiere a la energía/peso específico, este parámetro ya no muestra tanta diferencia y resulta desfavorable cuando se hace referencia a los aspectos mecánicos. No obstante su uso sigue siendo mayoritario debido a la importante diferencia de precios.

3.5 – ANÁLISIS DE LOS DATOS DE SALIDA

3.5.1 - Los factores estudiados

Otro de los parámetros fundamentales en el análisis de fiabilidad de un inventario son las emisiones más significativas del sistema. Por ello de las diferentes salidas que recogen los inventarios, en este análisis sólo nos vamos a fijar en cuatro factores principales:

- CO₂: Por su importante influencia en el efecto invernadero (cambio climático) y el carácter global de la misma.

- NO_x: Por su influencia en la acidificación y la eutrofización, teniendo un carácter regional.
- SO₂: Por su influencia en la acidificación y efecto regional.
- Polvo: Por la importante repercusión visual y directa con un efecto local sobre imagen y salud del entorno y sus habitantes.

En la elección se han considerado parámetros que incidan en los tres ámbitos: global, regional y local, para favorecer posteriormente el análisis desde estos tres puntos de vista. Conviene recordar que de las recientes "Cumbre Internacionales" sobre el cambio climático (por ej.: Protocolo de Kyoto), muchos países industrializados, entre ellos España, firmaron protocolos, en los que se comprometieron a reducir las emisiones de CO₂ por su reconocido efecto sobre el calentamiento global. Dentro del sector del cemento, Cembureau consciente de esa influencia, ha difundido entre su afiliados medidas para inducir en sus procesos cara a la reducción del consumo de combustibles fósiles.

En la tabla 3.6 se presentan las emisiones (en gramos) de los parámetros citados en la fabricación de 1 kg de cada uno de los cementos recogidos en los inventarios del Anejo 2. En el citado anejo puede verse que las emisiones pueden ser mucho más numerosas y que sin embargo se ha centrado en las 4 señaladas por las razones anteriormente apuntadas. En esta tabla se han agrupado los cementos por tipo para facilitar el análisis en términos equivalentes de clinker contenido en cada cemento.

Como elemento de contraste de la fiabilidad de los resultados medidos dados en los inventarios, se propone la utilización de un modelo numérico. Para la estimación de las emisiones de CO₂ y SO₂ en la producción de cemento, se ha utilizado la metodología propuesta por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambios Climáticos (IPCC), la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) y la Agencia Internacional de la Energía (AIE) (IPCC - OCDE - AIE, 1996). Dado el evidente interés del tema, en el anejo 3 se incluye la metodología utilizada por dichas organizaciones.

Para garantizar la consistencia de los resultados se ha incluido en el sistema de producción de 1 kg de cemento, las emisiones de los parámetros elegidos (CO₂, NO_x, SO₂, polvo) por cada MJ de energía eléctrica utilizado. Para ello es necesario conocer la respectiva matriz energética (procedencia de la energía) del país de origen del cemento que explícitamente indican cada inventario. En la tabla 3.7 se indican, respectivamente, las emisiones de CO₂, NO_x, SO₂ y POLVO de cada matriz energética citada en los inventarios del Anejo 2.

Tipo	Nomenclatura Original	Emisiones al aire (gramos)			
		CO ₂	NO _x	SO ₂	Polvo
I	Cement Portland I	355,00	0,96	0,43	10,00
	Cement CH	810,00	2,00	0,60	0,30
	Cement N	813,00	2,09	0,67	0,18
	Portlandcement NL1	853,00	2,58	0,09	7,50
	Cement S	805,00	1,94	0,45	0,16
	Cement SF1	780,00	3,70	0,63	0,39
	Cement SF2	812,70	2,95	1,33	0,32
II	Portland Cement	918,30	3,11	1,16	0,24
	Portlandcement A	586,00	1,57	0,12	0,17
	Portlandcement NL2	807,00	2,95	0,09	0,19
	Portlandcement NL3	289,00	0,71	0,98	79,60
III	Blastfurnace slag cement	221,70	0,51	0,51	10,00
	Cement Hoogoven I	334,00	1,11	0,58	0,08
	Blastfurnace slag cement NL1	212,00	0,85	0,03	0,14
	Blastfurnace slag cement NL2	134,00	0,40	0,43	88,60
IV	Portlandashcement	692,90	2,33	0,90	0,18

Tabla 3.6 – Principales sustancias emitidas (en gramos) al aire en la fabricación de 1kg de cemento.

Países	CO ₂	NO _x	SO _x (SO ₂)	POLVO
	g/MJ	g/MJ	g/MJ	g/MJ
AUSTRIA	80,40	0,155	0,327	0,089
FINLANDIA	112,00	0,265	0,616	0,120
HOLANDA	208,00	0,454	0,530	0,177
NORUEGA	1,19	0,003	0,006	0,001
PAISES NORDICOS	48,80	0,119	0,272	0,064
SUIZA	27,50	0,062	0,148	0,036
SUECIA	17,70	0,041	0,165	0,013
Europa-UCPTE	133,00	0,283	0,661	0,209
Electricity Holland	122,00	0,343	0,699	0,055
Electricity NI I	176,00	0,335	0,222	0,002

Tabla 3.7 - Emisiones al aire típicas de cada matriz energética de los inventarios [SimaPro, PRé Consultants, 1997]

3.5.2 - Emisiones de CO₂

Las emisiones de CO₂ en el sistema de obtención de 1 kg de cemento, se sitúan, de acuerdo con los inventarios estudiados, en las tres etapas siguientes:

- Resultado de la reacción química en el horno de obtención del clinker

- Combustible utilizado en obtención del clinker
- Energía consumida en todo el proceso (tanto clinker como cemento)

Ello implica que no se consideran otras fuentes de emisión tales como los combustibles utilizados en cantera durante la extracción de los áridos o bien los combustibles utilizados en las fases de distribución (transportes internos). En los inventarios utilizados, todo parece indicar que la fábrica de cemento obtiene también el clinker. Esta situación no tiene porque ser general por lo que debe ser tenida en cuenta a la hora de evaluar efectos locales.

La simplificación utilizada es razonable tal como puede verse en la figura 3.2. En ella se sitúan las principales fuentes de emisión de CO₂, con origen energético, en la producción del cemento en un sistema de cuna a puerta (desde la obtención de las materias primas a la salida de fábrica). Puede verse que las fases de cantera y distribución, representan un 1% y un 3% respectivamente del consumo de energía correspondiente a las incluidas entre los límites del sistema.

3.5.2.1 - Los resultados de los inventarios

Los resultados de las emisiones de CO₂ recogidos en la tabla 3.6 señalan que el contenido de CO₂ depende del tipo de cemento, o mejor dicho de la cantidad de clinker que tiene el cemento, ya que la aportación principal de CO₂ se produce en la fabricación del clinker. Para los cementos tipo I la emisión de CO₂ se sitúa en 800 gramos de CO₂ por kg de cemento, disminuyendo para los otros tipos de cementos en los que disminuye el contenido del clinker.

En la citada tabla puede verse que para el cemento denominado Cement Portland I del inventario SimaPro, la emisión de CO₂ (355 gramos) es claramente inferior al resto de los cementos del grupo, lo cual puede reflejar un error numérico, o bien que los límites del sistema del citado cemento están mal definidos (ya se había comentado la existencia de posibles errores en este cemento en el apartado 3.4.2.1 al tratarse del consumo de materiales). Una situación similar se da en el cemento denominado Portlandcement NL3 del inventario Cembureau en el que la emisión de CO₂ (289 gramos) es muy inferior a la que corresponde a su grupo. En la ficha de este cemento se da un tratamiento unitario y puede que no se hayan considerado aspectos relativos a la producción del clinker que sí se incluyen en el cemento denominado Portlandcement NL2.

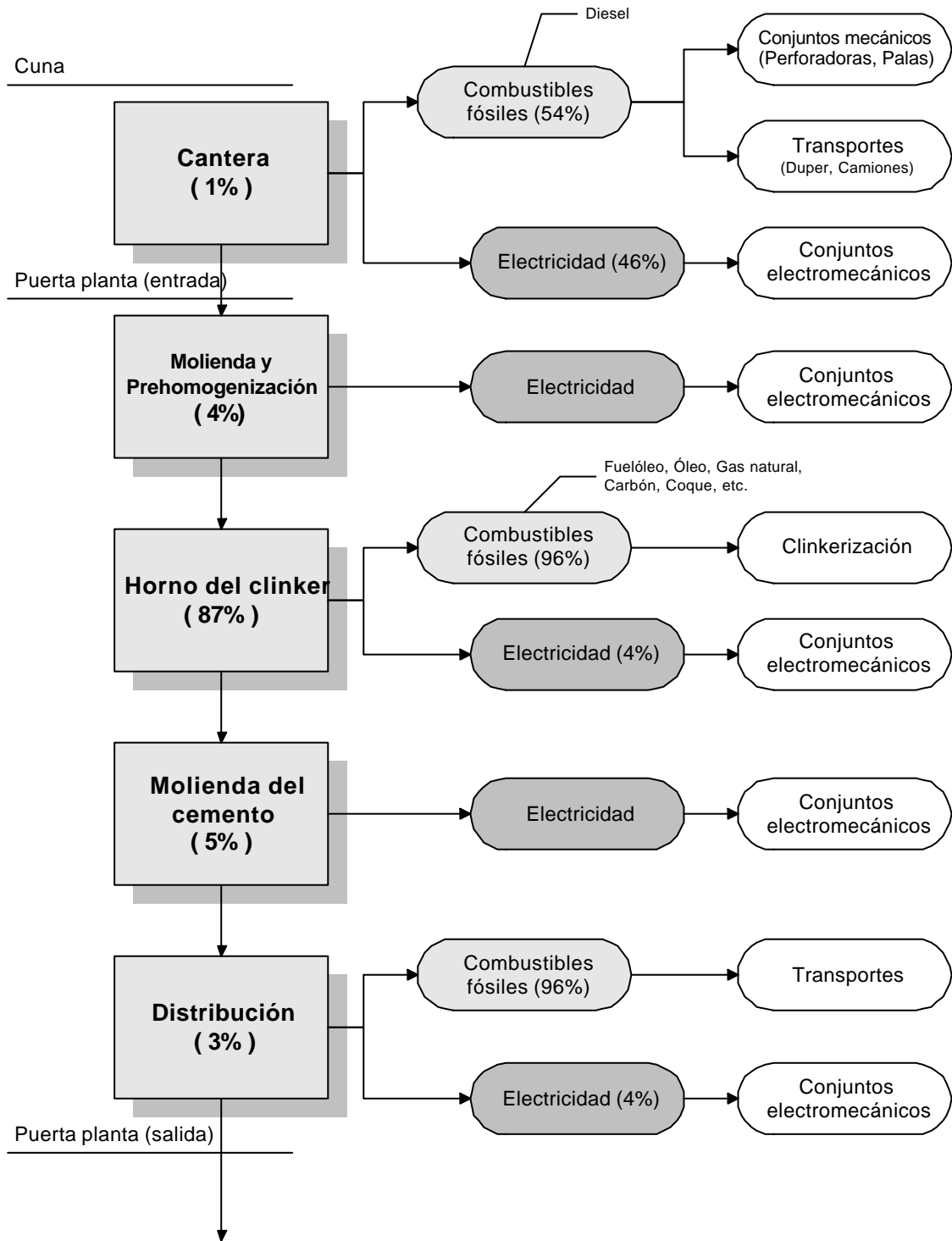


Figura 3.2 - Principales fuentes de emisión de CO₂, con respecto al consumo de energías en la producción del cemento (Límites: cuna a puerta)

3.5.2.2 - Los resultados de la estimación numérica

El procedimiento de estimación consiste en evaluar las emisiones de CO₂ de las tres fases principales señaladas (reacción química, consumo de combustibles fósiles y energía utilizada) a través de la aplicación de los denominados "factores de emisión". Los detalles numéricos de la estimación pueden verse en el citado anejo 3.

Para estimar el factor de emisión durante las reacciones químicas que se producen en la fabricación del clinker, el contenido de carbono utilizado se obtiene del promedio de la cal contenida en el clinker, en este caso se considera un 64,6%. Estimado el contenido de cal, todo él se convierte en cantidad de CO₂ emitido al multiplicarlo por un factor de emisión (FE_{clinker}) = 507,1 gramos de CO₂ por kilogramo de clinker producido.

Para la obtención del CO₂ emitido en la quema de combustibles fósiles, hay que tener en cuenta no sólo la cantidad de combustible si no también el tipo de combustible. A través de la aplicación del "Valor calorífico neto del combustible" y/o "factor de emisión de carbono" típico de cada combustible, se estima la cantidad de carbono oxidable para, posteriormente, convertirla en cantidad de CO₂ emitido al multiplicar su valor por el cociente entre pesos moleculares de CO₂/C (C = 12 y O = 16), resultando, entonces, $44/12 = 3,67$ kg de CO₂ por kilogramo de Carbono oxidable contenido en el combustible. (Ver anejo 3).

Los resultados obtenidos de este cálculo, desglosándolos para cada uno de los combustibles fósiles utilizados, se presentan en la tabla 3.8. En ella se incluye una columna de otros combustibles que es una vía para introducir residuos a valorizar como combustible, lo cual es una práctica conocida por el sector del cemento.

Para estimar las emisiones de CO₂ procedentes de la energía utilizada hay que considerar los valores dados en la tabla 3.7 de emisiones (gramos/MJ) para cada país y las energías utilizadas en el sistema presentadas en la tabla 3.4. Los resultados obtenidos (columna C) se presentan en la tabla 3.9. En ella se presentan asimismo los resultados de la reacción química (columna A) y la del consumo de combustibles (columna B), lo cual sumado da el total del modelo que se compara con dado en el inventario.

En dicha tabla puede apreciarse que las emisiones de CO₂ corresponden, principalmente (más del 90 % en los cementos tipo I), a las emisiones derivadas de las reacciones químicas que se producen en el horno de fabricación del clinker y de los combustibles utilizados en el mismo. Por otro lado, las emisiones de CO₂ correspondientes a la energía utilizada representan un porcentaje pequeño, que en el caso de los cementos tipo I no llega al 10 %.

Tipo	Nomenclatura Original	Tipos de combustibles usados							Suma (gramos)
		Fuelóleo	Óleo crudo	Carbón	Gas natural	Coque	Fuelóleo (res.)	Otras ^(a)	
I	Cement Portland I	261,6	-	-	47,46	-	-	-	309,07
	Cement CH	45,74	-	226,09	5,26	-	-	-	277,10
	Cement N	71,60	1,18	84,64	-	153,26	42,21	-	352,89
	Portlandcement NL1	261,61	-	-	-	-	-	-	261,61
	Cement S	71,60	16,35	84,64	-	153,26	42,21	-	368,06
	Cement SF1	379,26	-	-	-	-	-	-	379,26
	Cement SF2	294,12	-	-	-	-	-	-	294,12
II	Portland Cement	263,93	-	-	-	-	-	-	263,93
	Portlandcement A	63,47	-	118,94	3,10	16,74	15,44	26,40	244,09
	Portlandcement NL2	42,65	13,20	59,77	11,00	110,91	-	-	237,52
	Portlandcement NL3	261,61	-	-	-	-	-	-	261,61
III	Cement Hoogoven I	83,59	-	-	60,59	-	-	-	144,18
	Blastfurnace slag cement	77,48	-	-	-	-	-	-	77,48
	Blastfurnace slag cement NL1	11,22	3,48	15,73	2,10	29,24	-	-	61,78
	Blastfurnace slag cement NL2	83,59	-	-	-	-	-	-	83,59
IV	Portlandashcement	195,82	-	-	-	-	-	-	195,82

^(a) La utilización de combustibles a partir de residuos (papel, plástico, neumáticos, etc).

Tabla 3.8 - Emisiones de CO₂(en gramos) según el modelo teórico del IPCC, desglosado por tipo de combustible, en la fabricación de 1 kg de cemento

Tipo	Nomenclatura Original	Emisiones de CO ₂ (gramos)				
		cálculo teórico				Inventariado
		Descarbonatación (A)	Comb.fósiles (B)	Electricidad (C)	Suma (A+B+C)	
I	Cement Portland I	476,67	309,07	55,97	841,71	355,00
	Cement CH	491,89	277,10	74,08	843,06	810,00
	Cement N	481,75	352,89	14,38	849,01	813,00
	Portlandcement NL1	476,67	261,61	66,14	804,43	853,00
	Cement S	481,75	368,06	4,439	854,24	805,00
	Cement SF1	481,75	379,26	50,40	911,41	780,00
	Cement SF2	481,75	294,12	15,86	791,73	812,70
II	Cement Portland	481,75	263,93	34,16	779,84	918,30
	Portlandcement A	400,61	244,09	30,71	675,41	586,00
	Portlandcement NL2	395,54	237,52	24,13	657,19	807,00
	Portlandcement NL3	375,25	261,61	66,14	703,01	289,00
III	Cement Hoogoven I	152,13	144,18	62,48	358,79	221,70
	Blastfurnace slag cement	126,78	77,477	71,49	275,74	334,00
	Blastfurnace slag cement NL1	116,63	61,779	59,70	238,11	212,00
	Blastfurnace slag cement NL2	121,70	83,592	73,63	278,93	134,00
IV	Portlandashcement	354,97	195,82	35,75	586,54	692,90

Tabla 3.9 -Emisiones de CO₂ (en gramos) de cada una de las etapas, y de las registradas en el inventario

3.5.2.3 - Comparación de resultados

Este planteamiento se ha realizado para todos los cementos estudiados y se ha comparado con los resultados dados en los inventarios de los mismos. Esa comparación se puede ver de forma gráfica en la figura 3.3. En ella puede apreciarse, en general, una buena concordancia entre el valor dado en el inventario y el estimado a partir del modelo teórico citado.

No obstante se aprecian disfunciones, algunas de ellas ya reflejadas anteriormente, como es el caso del cemento denominado Cement Portland I, o bien el denominado Portland Cement (del inventario SimaPro) en el que las cantidades suman más que la unidad tal como se ha reflejado en el apartado 3.4.2.1.

Por otro lado, en el cemento denominado Portlandcement NL3 y Blastfurnace slag cement NL2 del inventario Cembureau la emisión de CO₂ (289 g y 134 g) es muy inferior a la estimada según el modelo teórico, lo cual puede ser reflejo, tal como se ha dicho con anterioridad a que en este cemento se da un tratamiento unitario y puede que no se hayan considerado aspectos relativos a la producción del clinker. Esa buena concordancia general da pie a pensar en utilizar el modelo teórico como elemento de contraste o estimación en algún caso.

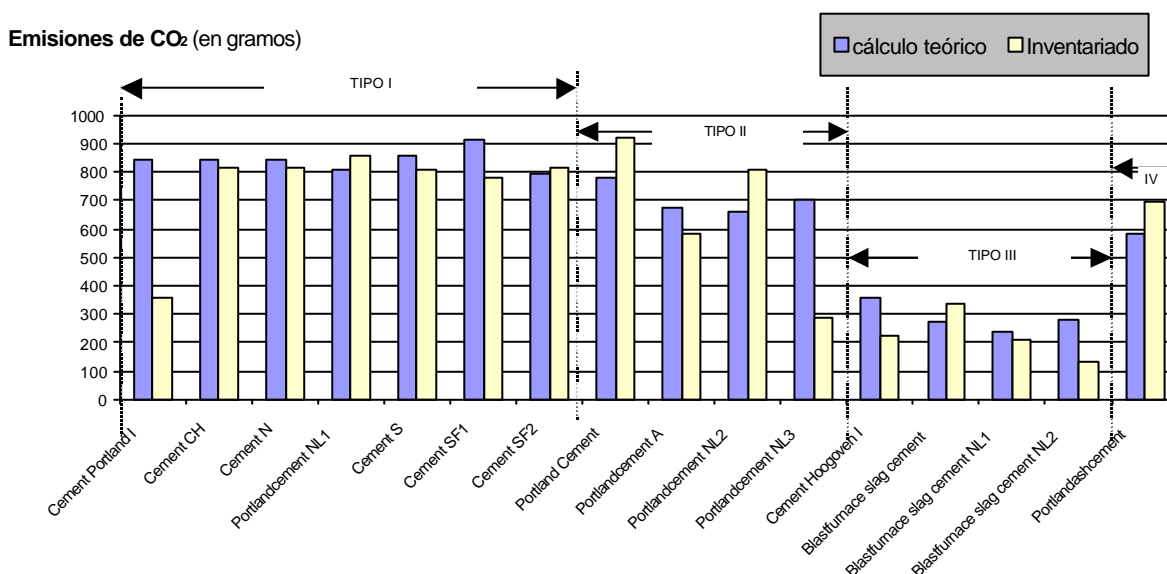


Figura 3.3 - Comparación entre las emisiones totales de CO₂ obtenidas según el modelo y las registradas en los inventarios para cada tipo de cemento

Además, en la figura 3.3 se aprecia una sensible reducción de las emisiones para los cementos tipo III, considerando que en estos tipos de cementos el clinker es sustituido en hasta un 66% del total por escorias del horno alto siderúrgico o cenizas y las emisiones de estos co-productos no son imputadas a la producción del cemento negativamente.

Una forma diferente de visualizar estos resultados es evaluar la contribución de cada una de las fases estudiadas (reacción química, consumo de combustibles fósiles y energía utilizada) en las emisiones de CO₂. Así en la figura 3.4 se muestra estos resultados calculados con base en los datos estadísticos de Oficemen para el año de 1996, y en los cuales se puede observar que el 59 % corresponde a las reacciones químicas producidas en la fabricación del clinker y el 35 % es consecuencia del consumo de combustibles en dicha etapa. La cifra del 6 % (considerado como 10% del consumo energético total) responde al consumo de energía en todas las etapas.

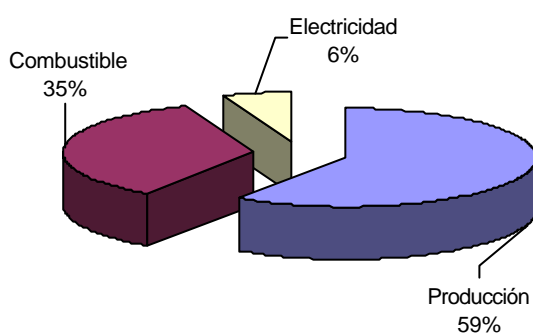


Figura 3.4 - Porcentajes de emisión de CO₂ correspondiente a las fases principales estudiadas [Fuente Oficemen]

Hay que resaltar que la aportación principal de CO₂ responde a la fabricación del clinker, el cual puede ser fabricado en un lugar diferente a la fábrica del cemento. Ello permite hacer políticas de actuación, basándose en los tipos de impacto y el punto de vista del análisis, tal como se verá en el capítulo 5.

3.5.3 - Emisiones de NO_x

El NO_x expresa los gases dióxido de nitrógeno (NO₂) y el óxido de nitrógeno (NO) emitidos al aire. Estos gases se emiten, mayoritariamente, en las siguientes fases:

- Combustible utilizado en obtención del clinker
- Energía consumida en todo el proceso (tanto clinker como cemento)

En el caso de estos gases no existen emisiones por reacciones químicas en la fabricación del clinker como pasaba en las emisiones de CO₂. Por otro lado, las cantidades de las emisiones de NO_x en la fabricación del clinker están asociadas al tipo de combustible utilizado y la tecnología del proceso (factores de combustión como: temperatura, exceso de aire, etc.).

3.5.3.1 - Los resultados de los inventarios

Los resultados de las emisiones de NO_x recogidos en la tabla 3.6 presentada con anterioridad en el apartado 3.5.1, señalan que el contenido de NO_x depende del tipo de cemento, o mejor dicho de la cantidad de clinker que tiene el cemento, ya que la aportación principal de NO_x se produce en la fabricación del clinker.

En el presente caso, el valor medio de las emisiones de NO_x para los cementos tipo I estudiados, se sitúan en el entorno de los 2,4 gramos por kilogramo de cemento. No obstante, las variaciones existentes son mayores que en el caso anterior, aunque corresponden generalmente a los mismos cementos. Así, para el Cemento Portland I (SimaPro) las emisiones son claramente inferiores al resto de cementos del tipo I, lo cual puede responder a una mala definición de los límites del sistema o a un problema de otro tipo (error numérico, nomenclatura, etc).

Por otro lado, en los cementos tipo II, los denominados Portland Cement (SimaPro) y Portlandcement NL2 (Cembureau), dan valores altos de las emisiones de NO_x, por encima de lo que parece debería corresponder a un cemento de ese tipo. En el primer caso puede deberse a que en realidad se trate de un cemento tipo I o a que el sistema no está calculado sobre 1 kg de cemento, tal y como se ha apuntado en la tabla de materias primas utilizadas. En el segundo caso, puede que exista algún error numérico de asignación o bien no estén bien definidos los límites del sistema.

Una situación opuesta se produce en el Portlandcement NL3 (Cembureau), el cual da valores significativamente inferiores a los otros cementos de su mismo tipo. Este cemento ya presentaba unos resultados similares en la emisión de CO₂, por lo que puede no estén bien definidos los límites del sistema.

3.5.3.2 - Los resultados de la estimación numérica

Con objeto de contrastar los valores medidos de las emisiones de NO_x dados en la tabla 3.6, se aplica la metodología propuesta por IPCC/OECD/IEA (Anejo 3) ya planteada con anterioridad, para la estimación de las emisiones de CO₂. En este caso no existen emisiones derivadas de las reacciones químicas que se producen en la fabricación del clinker, y sí en la quema de combustibles fósiles, por lo que hay que tener en cuenta no sólo la cantidad de combustible sino también el tipo.

Para obtener los resultados teóricos se ha tomado como referencia los Factores de emisión del NO_x de la tabla 1-17 del libro 3 del IPCC/OECD/IEA, 1996 de IPCC (véase Anejo 3) que hace referencia al horno de clinker y el tipo de combustible utilizado (1111kg/TJ en horno con gas natural y 527 kg/TJ en hornos con fuel o carbón). Dado que se conoce el consumo de combustible en la fabricación de cada tipo de cemento, es fácil obtener la suma de los combustibles utilizados por el factor de emisión, obteniéndose el total.

Los resultados se presentan en la tabla 3.10. desglosando la contribución de cada combustible utilizado en la fabricación de cada tipo de cemento.

Tipo	Nomenclatura Original	Emisiones de NO_x por el uso de diferentes tipos de combustibles							
		Fuelóleo	carbón	oil	Gas natural	Fuelóleo (res.)	Otras ^(a)	coque	SUMA
I	Cement Portland I	1,781	-	-	0,940	-	-	-	2,721
	Cement CH	0,311	1,212	-	0,104	-	-	-	1,628
	Cement N	0,487	0,454	0,008	-	0,281	-	0,801	2,032
	Portlandcement NL1	1,781	-	-	-	-	-	-	1,781
	Cement S	0,487	0,454	0,118	-	0,281	-	0,801	2,141
	Cement SF1	2,582	-	-	-	-	-	-	2,582
	Cement SF2	2,003	-	-	-	-	-	-	2,003
II	Cement Portland	1,797	-	-	-	-	-	-	1,797
	Portlandcement A	0,432	0,638	-	0,061	0,103	0,190	0,087	1,511
	Portlandcement NL2	0,290	0,320	0,095	0,218	-	-	0,580	1,503
	Portlandcement NL3	1,781	-	-	-	-	-	-	1,781
III	Cement Hoogoven I	0,569	-	-	1,200	-	-	-	1,769
	Blastfurnace slag cement	0,528	-	-	-	-	-	-	0,528
	Blastfurnace slag cement NL1	0,076	0,084	0,025	0,042	-	-	0,153	0,380
	Blastfurnace slag cement NL2	0,569	-	-	-	-	-	-	0,569
IV	Portlandashcement	1,333	-	-	-	-	-	-	1,333

Tabla 3.10 - Emisiones de NO_x (en gramos) según el modelo teórico del IPCC, desglosado por tipo de combustible, en la fabricación de 1 kg de cemento

Para estimar las emisiones de NO_x procedentes de la energía utilizada hay que considerar los valores dados en la tabla 3.6 de emisiones (gramos/MJ) para cada país y las energías (de origen térmico) utilizadas en el sistema, presentadas en la tabla 3.4. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 3.11. En ella se presenta, asimismo, el resumen de los resultados del consumo de combustibles, lo cual sumado da el total del modelo que se compara con el dado en el inventario.

En la citada tabla 3.11 puede observarse que la aportación en las emisiones de NO_x, durante la quema del combustible fósil utilizado en la fabricación del clinker es de un orden de magnitud 10 veces mayor que el correspondiente a la obtención de la energía utilizada en todas las fases del proceso.

Tipo	Nomenclatura Original	Emisiones de NO _x (en gramos)			
		cálculo teórico			Inventariado (C)
		Electricidad (A)	Comb.fosiles (B)	Suma (A+B)	
I	Cement Portland I	0,107	2,721	2,828	0,957
	Cement CH	0,158	1,628	1,786	2,000
	Cement N	0,032	2,032	2,064	2,090
	Portlandcement NL1	0,144	1,781	1,926	2,580
	Cement S	0,010	2,141	2,151	1,940
	Cement SF1	0,119	2,582	2,702	3,700
	Cement SF2	0,039	2,003	2,041	2,950
II	Cement Portland	0,096	1,797	1,893	3,110
	Portlandcement A	0,059	1,511	1,570	1,570
	Portlandcement NL2	0,053	1,503	1,556	2,950
	Portlandcement NL3	0,144	1,781	1,926	0,706
III	Cement Hoogoven I	0,119	1,769	1,888	0,508
	Blastfurnace slag cement	0,201	0,528	0,729	1,110
	Blastfurnace slag cement NL1	0,130	0,380	0,511	0,850
	Blastfurnace slag cement NL2	0,161	0,569	0,730	0,399
IV	Portlandashcement	0,099	1,333	1,433	2,326

Tabla 3.11 -Emisiones de NO_x (en gramos) de cada etapa, según el modelo del IPCC, y de las totales dadas en el inventario correspondiente a cada cemento

3.5.3.3 - Comparación de resultados

Este planteamiento se ha realizado para todos los cementos estudiados y se ha comparado con los resultados dados en los inventarios de los mismos. Esa comparación se puede ver de forma gráfica en la figura 3.5. En ella puede apreciarse, en general, una buena concordancia entre el valor dado en el inventario y el estimado a partir del modelo teórico citado.

Los resultados muestran que el camino seguido para la estimación numérica de las emisiones puede ser una alternativa viable a las mediciones in situ en cada una de las etapas del proceso. Ahora bien, existen diferencias significativas entre los resultados medidos y los estimados, algunas de ellas en los mismos cementos donde se producían diferencias en las emisiones de CO₂.

Así, para los cementos tipo I, el cemento denominado Cement Portland I, registra unos valores de las emisiones de NO_x por debajo de los correspondientes según la estimación del

IPCC. Ello, una vez más debe ser fruto de una mala definición de los límites del sistema o de no incluir algunas emisiones de los subsistemas. Por el contrario, en los cementos Cement SF1 y Cement SF2 los resultados registrados están por encima de los estimados. Esta discrepancia, cuando la concordancia en los resultados de las emisiones de CO₂ era buena, puede deberse a una incorrecta interpretación por nuestra parte de algunos de los datos.

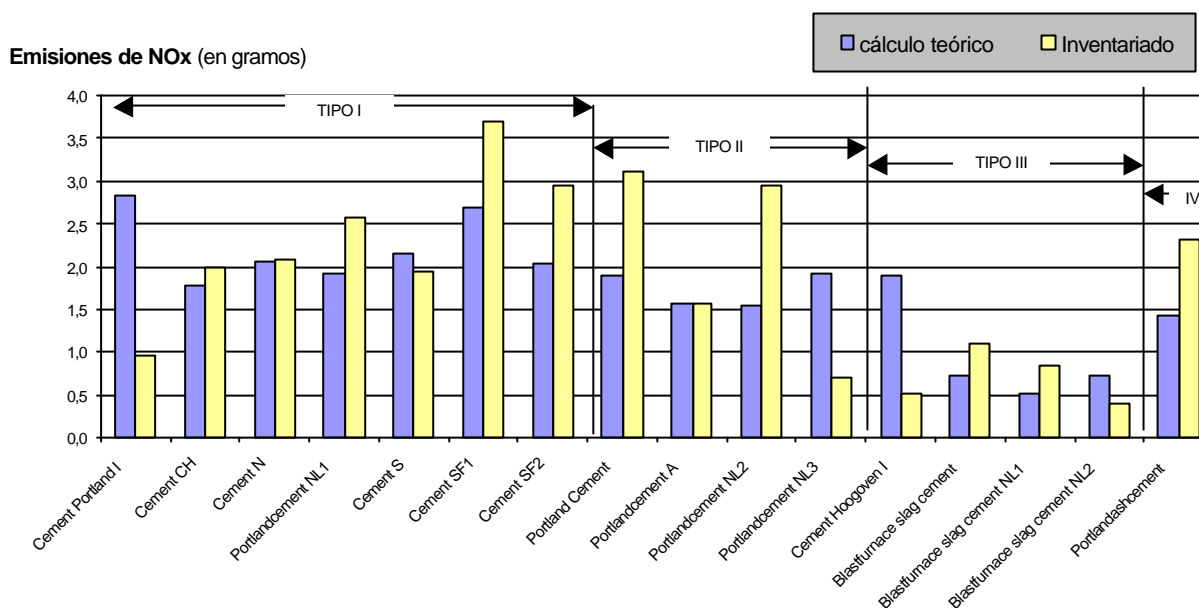


Figura 3.5 - Comparación entre las emisiones de NO_x obtenidas según el modelo y las dadas en los inventarios para cada tipo de cemento

Con relación a los cementos tipo II las discrepancias entre los resultados se sitúan en el denominado cemento Portland Cement y en Portlandcement NL2, los cuales ya habían presentado resultados discrepantes en las emisiones de CO₂. El análisis de estas discrepancias puede ser el mismo que el señalado en aquel caso. En el caso del cemento Portlandcement NL2 las discrepancias son de sentido contrario a las dos anteriores siendo, el valor registrado significativamente inferior al valor estimado y a los otros cementos de su mismo tipo. Este cemento ya presentaba unos resultados similares en la emisión de CO₂, por lo que puede no estén bien definidos los límites del sistema.

Las evidentes reducciones de las emisiones que se observa en la figura 3.5 responden a la mayor cantidad de clinker que es sustituido, pudiéndose alcanzar hasta un 66% del total por escorias del horno alto siderúrgico o cenizas. Las emisiones derivadas de la obtención de estas materias primas, no están imputadas al sistema de producción del cemento (es decir, quedan excluidas de los límites del sistema). En su consideración habrá que tener en cuenta, tanto los efectos negativos, como los positivos de utilizar residuos como materias primas.

3.5.4 - Emisiones de SO₂

Las emisiones de SO₂ en el sistema de obtención de 1 kg de cemento, corresponderán a las tres etapas siguientes:

- Resultado de la reacción química que se produzcan en el horno de obtención del clinker, a partir del contenido de azufre de las arcillas y materias primas empleadas.
- A la quema del azufre contenido en el combustible utilizado en obtención del clinker
- A la quema del azufre en la obtención de la energía consumida en todo el proceso (tanto clinker como cemento)

Las emisiones principales de SO₂ corresponden mayoritariamente a la quema del azufre contenido en el combustible utilizado en obtención del clinker y al proceso de las materias primas en el horno. Ahora bien para la evaluación hay que tener presente que, según la IPCC, parte de esta emisión (cerca de 70-95% de la fracción no energética) es absorbida a causa de la alcalinidad del clinker. El resto es emitido al aire.

3.5.4.1 - Los resultados de los inventarios

Los resultados de las emisiones de SO₂ recogidos en la tabla 3.6. señalan que el contenido de SO₂ depende del tipo de cemento, o mejor dicho de la cantidad de clinker que tiene el cemento, ya que la aportación principal de SO₂ se produce en la fabricación del clinker. En cualquier caso los resultados generales parecen reflejar una dispersión mayor que en las emisiones anteriormente estudiadas.

Para los cementos tipo I la emisión de SO₂ se sitúa en el entorno de 0,4 a 0,6 gramos de SO₂ por kg de cemento, disminuyendo para los otros tipos de cementos en los que disminuye el contenido del clinker. En la citada tabla puede verse que para el cemento denominado Portlandcement NL1, las emisiones son muy inferiores a las del resto del grupo de cementos mientras que para el cemento Cement SF2 las emisiones son muy superiores a los valores de la banda, antes definida.

Para los cementos tipo II la emisión de SO₂ del cemento Cement Portland y del Portlandcement NL3 dan valores muy superiores a lo que sería esperable para un cemento tipo II, pudiendo responder, en el primer caso, a un problema de que el sistema sea mayor a la unidad (tal como se ha reflejado con anterioridad) y, en el segundo caso, a un problema en la definición de los límites del sistema, tal como asimismo, se ha apuntado con anterioridad en el análisis de otros tipos de emisiones de este cemento.

3.5.4.2 - Los resultados de la estimación numérica

El procedimiento de estimación seguido por la IPCC para la evaluación de las emisiones de SO₂ resultantes de las reacciones químicas que se produzcan en el horno de obtención del clinker, a partir del contenido de azufre de las arcillas y materias primas empleadas, en este caso no responde a la metodología general, ya que no han descrito los factores de emisión procedentes de las reacciones químicas que se producen con el azufre contenido en las arcillas y otras materias primas.

No obstante el IPCC ha desarrollado un planteamiento simplificado (ver anejo 3), partiendo de la experiencia de los países nórdicos refiere a Rypdal (1995), que estima unas emisiones medias de SO₂ de 300 miligramos por kilogramo de cemento, en el caso de se desconocer el contenido de azufre y el grado de absorción. Este valor se supone que es para cementos tipo I, por lo que la extrapolación a otros cementos se ha hecho teniendo en cuenta el contenido de clinker existente en los mismos.

A las emisiones anteriores hay que sumar las correspondientes a: la quema del azufre contenido en el combustible utilizado en obtención del clinker y la quema del azufre en la obtención de la energía consumida en todo el proceso (tanto clinker como cemento). Los resultados conjuntos de estas tres fases se presentan en la tabla 3.12.

Tipo	Nomenclatura Original	Emisiones de SO ₂				Inventariado (D)
		cálculo teórico				
		Clinker (A)	Comb.fosiles (B)	Electricidad (C)	Suma (A+B+C)	
I	Cement Portland I	282,00	8,58	70,66	361,24	426,00
	Cement CH	291,00	9,47	370,16	670,63	600,00
	Cement N	285,00	11,96	110,15	407,11	671,00
	Portlandcement NL1	282,00	0,86	168,54	451,40	85,00
	Cement S	285,00	12,48	40,29	337,77	451,00
	Cement SF1	285,00	12,44	277,20	574,64	630,00
	Cement SF2	285,00	9,65	88,40	383,05	1330,00
II	Cement Portland	285,00	8,66	195,72	489,38	1160,00
	Portlandcement A	237,00	8,31	124,91	370,22	119,00
	Portlandcement NL2	234,00	20,26	61,48	315,74	91,00
	Portlandcement NL3	222,00	8,58	168,54	399,12	975,00
III	Cement Hoogoven I	90,00	2,74	78,88	171,62	579,00
	Blastfurnace slag cement	75,00	2,54	409,61	487,16	580,00
	Blastfurnace slag cement NL1	69,00	1,69	152,11	222,80	31,20
	Blastfurnace slag cement NL2	72,00	2,74	187,62	262,36	430,00
IV	Portlandashcement	210,00	6,42	202,71	419,13	899,00

Tabla 3.12 - Emisiones de SO₂ (en miligramo) de cada etapa, según el modelo del IPCC, y de las totales dadas en el inventario correspondiente a cada cemento

Con respecto a las emisiones derivadas de la quema de combustibles fósiles del IPCC propone un factor de equivalencia de acuerdo con la siguiente expresión:

$$FE_{SO_2[kg/TJ]} = 2 \times \left(\frac{s}{100} \right) \times \frac{1}{Q} \times 10^6 \times \left(\frac{100-r}{100} \right) \times \left(\frac{100-n}{100} \right)$$

FE_{SO_2} - Factor de emisión del SO_2 , en kilogramos por terajoule de energía;

2 - SO_2 / S [peso molecular; S = 32 y O = 16];

s - Contenido de azufre en el combustible; [se ha considerado en todos los casos 0,001%- Tabla 1-12, IPCC, Reference Manual];

Q - Valor calorífico neto del combustible (TJ / kt); [Variable en función del tipo de combustible, en este caso entre 30,14 para el carbón y 43,33 para el fuelóleo];

10^6 - Factor de conversión en unidad;

r - Retención del azufre en la ceniza (%); [Se ha considerado de un 5% en los combustibles sólidos y de 0% en los combustibles líquidos];

n - Eficiencia de la tecnología y/o eficiencia de retención (%); [Se ha tomado un 45% para todos los combustibles].

Los resultados que se muestran en la tabla 3.12, se obtienen multiplicando el Factor de Equivalencia por la cantidad de combustible consumida en la fabricación de cada cemento asociada al equivalente energético de cada combustible.

Por otro lado, en el proceso de fabricación de 1 kg de cemento se consume energía proveniente de diferentes fuentes de acuerdo con la matriz energética de cada país (Ver tabla 3.6). Los combustibles fósiles utilizados tienen compuestos de azufre que en la quema de los mismos dan lugar a emisiones de SO_2 , las cuales pueden estimarse a partir del factor de equivalencia antes descrito, si bien teniendo en cuenta que las entradas en este caso son diferentes al anterior (consumos de combustible en cada fábrica y consumos de combustibles generales en la matriz energética del país).

En la citada tabla 3.12 los mayores porcentajes de las emisiones corresponden a las reacciones que se producen en el horno durante la fabricación del clinker a partir de los componentes de azufre existentes en las materias primas (estos porcentajes se sitúan, en general, por encima del 40 %). Por el contrario los menores porcentajes corresponden a la quema del azufre contenido en el combustible utilizado en obtención del clinker y situándose en valores intermedios los correspondientes a la quema del azufre en la obtención de la energía consumida en todo el proceso.

3.5.4.3 - Comparación de resultados

La comparación de los resultados (registrados en los inventarios de los mismos y obtenidos según estimaciones) recogidos en la tabla 3.12 se realiza para todos los cementos estudiados. Esa comparación puede verse de forma gráfica en la figura 3.6. En ella puede apreciarse, en general, una buena concordancia entre el valor dado en el inventario y el estimado a partir del modelo teórico citado.

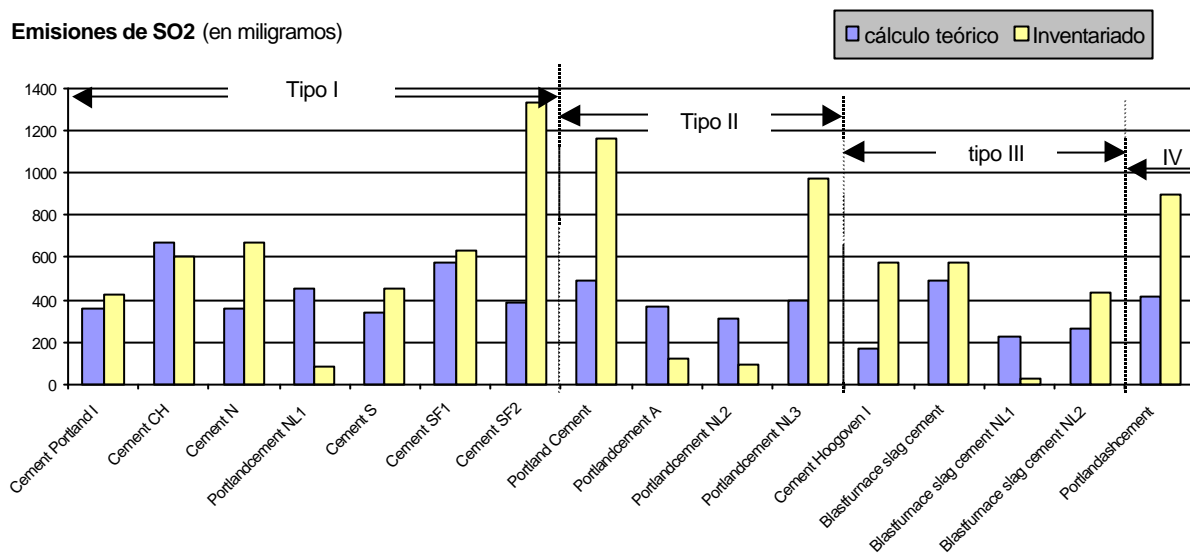


Figura 3.6 - Comparación entre las emisiones de SO_2 obtenidas según el modelo y las registradas en los inventarios para cada tipo de cemento

Los resultados muestran, nuevamente, que el camino seguido para la estimación numérica de las emisiones puede ser una alternativa viable a las mediciones in situ en cada una de las etapas del proceso. Ahora bien, existen diferencias significativas entre los resultados medidos y los estimados, algunas de ellas en los mismos cementos donde se producían diferencias en las otras emisiones estudiadas.

Así, para los cementos tipo I, el cemento denominado Portlandcement NL1, registra unos valores de las emisiones de SO_2 muy por debajo de los valores estimados, lo cual podría señalar alguna laguna de registro, en especial cuando se trata de un tipo I y el valor total dado está en 0,085 gramos/kg de cemento, muy por debajo del valor estimado para una sola fase de 0,3 gramos/kg de cemento. Por el contrario, en el cemento Cement SF2 los resultados registrados están muy por encima de los estimados, siendo redundante con respecto a los valores obtenidos en las emisiones de NO_x , lo cual puede apuntar a una incorrecta definición de los límites del sistema.

Con relación a los cementos tipo II las discrepancias entre los resultados se sitúan todos los cementos, aunque son de diferente signo. Así en los denominados cemento Portland Cement y Portlandcement NL3, los cuales ya habían presentado resultados discrepantes en las emisiones de CO₂ y NO_x, los valores registrados están muy por encima de los valores estimados, siendo estos bastante razonables, mientras que en los cementos denominados Portlandcement A y Portlandcement NL2, los valores registrados están muy por debajo de los valores estimados.

3.5.5 - Emisiones de polvo

El polvo constituye uno de los contaminantes del aire, de efecto local, caracterizado no sólo por la degradación física y visual del entorno a la planta industrial, si no también, por la contaminación por presencia de partículas sólidas en el aire que se respira en esta zona. Como consecuencia de su fácil visualización, estas pequeñas partículas en suspensión en el aire o depositada en el suelo, resultaron objeto de las primeras medidas de control medioambiental de zonas industriales. Todo ello se tradujo, ya hace tiempo, dentro de las normativas de control, en la obligatoriedad de implantación de unidades filtrantes y el control riguroso del nivel de emisión.

Dado que con frecuencia, las etapas de extracción de los áridos, la fabricación del clinker y la fabricación del cemento se encuentran en una mismo entorno físico, la repercusión de las emisiones de polvo tiene un carácter, marcadamente local.

3.5.5.1 - Los resultados de los inventarios

Los resultados respecto a las emisiones de polvo, ya se han presentado con anterioridad, en la tabla 3.6. En ella puede verse significativas diferencias de un cemento a otro, que deben responder a diferentes respuestas tecnológicas de los filtros utilizados, si bien en general se sitúa en el entorno de 0,2 a 0,3 gramos por cada kg de cemento fabricado.

Los valores máximos se sitúan en los cementos Portlandcement NL3 y Blastfurnace slag cement NL2; los cuales presentan, respectivamente, valores de 79,6 y 88,6 gramos por kilogramo de cemento, valores estos muy superiores al resto de los cementos. Ello puede responder a los aspectos tecnológicos señalados o bien en la propia definición de los límites, aspecto este que se repite de forma sistemática en muchos de los comentarios realizado en este capítulo y que es de capital importancia.

2.5.5.2 - Los resultados de la estimación numérica

La estimación numérica en este caso no se hace según un modelo dado por el IPCC, tal y como se ha hecho en los casos anteriores, dado que no existe, sino que se hace a partir de las

emisiones de polvo de cada matriz energética de los inventarios (ver tabla 3.6 dada con anterioridad). Así se tiene en cuenta las cantidades consumidas en la producción del cemento de la energía eléctrica y de los combustibles fósiles. A ellos se aplican, respectivamente, las emisiones de polvo (gramos/MJ) dadas en la tabla 3.6, correspondiente, a cada matriz energética y las emisiones dadas en la tabla 3.13 a cada tipo de combustible fósil consumido para la producción de la energía térmica. Por falta de parámetros no están incluidas, en ninguno de los casos, las emisiones ocurridas por las acciones mecánicas de machaqueo de los áridos, de la molienda del material crudo o de la molienda del cemento que constituyen unas fuentes significativas de emisión de polvo.

Tipo de combustible	Polvo
Carbón	100,00
Fuelóleo	58,60
Fueloleo residual	26,80
Oil	58,60
Coque	58,60
Gas Natural	3,06
Otros	58,60

Tabla 3.13 - Emisiones de Polvo (en gramos) típica de la quema de combustibles fósiles en la producción de energía térmica [Fuente: SimaPro, PRé Consultants, 1977]

En la tabla 3.14 se muestran los valores estimados de polvo para cada tipo de cemento. Los resultados corresponden solamente a la suma de las emisiones que ocurren durante la producción de la electricidad consumida (columna A) y las resultantes de la quema de combustibles fósiles (columna B).

3.5.5.3 - Comparación de resultados

De los resultados registrados en los inventarios y obtenidos según estimaciones, presentados en la tabla 3.14 se hace una comparación de forma gráfica la cual puede verse en la figura 3.7. En dicha figura se excluye a los cementos que presentan valores por encima de 0,5 gramos (cementos Cement Portland I, Portlandcement NL1, Portlandcement NL3 Cement Hoogoven I y Blastfurnace slag cement NL2), cuyas emisiones son excesivas y claramente por encima de los valores medios de los demás cementos.

En ella puede apreciarse, en general, una buena concordancia entre el valor dado en el inventario y el estimado a partir del modelo teórico citado. Las discrepancias encontradas en este caso son pequeñas ya que se han eliminado de la muestra los valores extremos. En cualquier caso, esta buena concordancia señala la viabilidad del modelo de cálculo como alternativa para la

estimación de las emisiones de polvo originados en la producción de electricidad y quema de combustibles fósiles.

Tipo	Nomenclatura Original	Emisiones de Polvo (gramos)			
		cálculo teórico			Inventariado (C)
		Comb.fosiles (A)	Electricidad (B)	Suma (A+B)	
I	Cement Portland I	0,205	0,001	0,2058	10,00
	Cement CH	0,197	0,117	0,3137	0,300
	Cement N	0,166	0,0149	0,1812	0,181
	Portlandcement NL1	0,198	0,056	0,2544	7,500
	Cement S	0,208	0,006	0,2146	0,162
	Cement SF1	0,287	0,054	0,3411	0,390
	Cement SF2	0,223	0,021	0,2434	0,320
II	Cement Portland	0,200	0,015	0,2151	0,244
	Portlandcement A	0,214	0,034	0,2478	0,171
	Portlandcement NL2	0,172	0,021	0,1923	0,187
	Portlandcement NL3	0,198	0,056	0,2544	79,60
III	Cement Hoogoven I	0,065	0,001	0,0660	10,00
	Blastfurnace slag cement	0,059	0,032	0,0907	0,083
	Blastfurnace slag cement NL1	0,045	0,051	0,0956	0,141
	Blastfurnace slag cement NL2	0,063	0,063	0,1259	88,60
IV	Portlandashcement	0,148	0,016	0,1641	0,182

Tabla 3.14 – Emisión de Polvo(en gramos) al aire en la fabricación de 1kg de cemento.

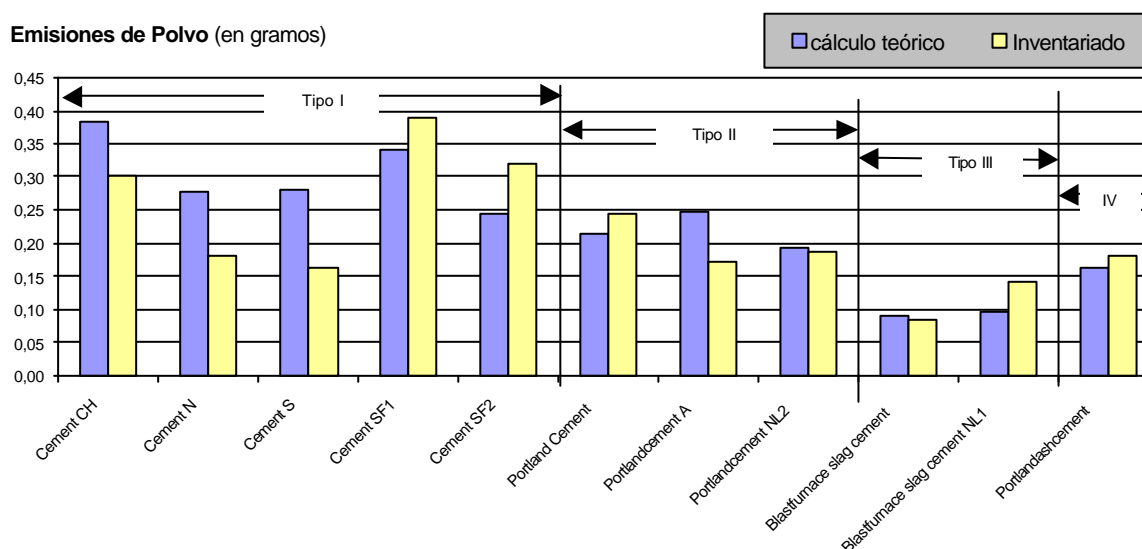


Figura 3.7 - Comparación entre las emisiones de Polvo obtenidas según el modelo y las registradas en los inventarios para cada tipo de cemento

3.5.6 - Otras emisiones

En los inventarios disponibles se muestran otros tipos de emisiones, algunas de ellas con orden de magnitud de los microgramos por kilogramo de cemento producido, tal como es el caso de los metales pesados (Cd, Cr, Hg, Pb, etc.). Estas emisiones se producen, principalmente, debido al uso de combustibles fósiles u otros tipos de combustibles alternativos. Los efectos tienen un carácter local correspondientes al entorno donde se produce la quema del combustible, pero, con riesgos de disipación y contaminación alejada de la fuente emisora. A pesar de las pequeñas cantidades emitidas, con respecto a las emisiones estudiadas con anterioridad, sus efectos de contaminación pueden ser relevantes y negativos sobre la salud humana, por lo que es necesario su registro y verificación respecto a los valores especificados en las normativas.

En una situación análoga se producen otras emisiones como los Aldehídos, Arsénico y los PAH's (Hidrocarburos poli aromáticos), que a pesar de las pequeñas cantidades emitidas resultan en efectos cancerígenos. Entre los inventarios disponibles solamente los cementos Cement Portland y Cement Hoogoven I, de la base de datos SimaPro, registran la presencia de esas sustancias (Metales pesados, Aldehídos, Arsénico y PAH's) y con excepción del Portlandcement NL1 y Blastfurnace slag cement NL2 (Cembureau), todos los demás también apuntan la presencia de esas emisiones.

Además existen otras sustancias emitidas tales como N_2O , CH_4 , CO , entre otras, que de forma directa o indirecta contribuyen a determinados mecanismos medioambientales. La presencia de emisiones de esa naturaleza, a igual que las otras, deben ser registradas en los inventarios, principalmente, cuando sea requerido un análisis profundizado en el análisis del ciclo de vida del producto.

3.6 - CONCLUSIONES

Del análisis riguroso y detallado de los datos de entradas y salidas del sistema de producción de 1 kg de cemento de los inventarios analizados se desprende las siguientes conclusiones principales:

- Los límites de los sistemas de los diferentes cementos existentes en los inventarios no son homogéneos, lo cual dificulta, lógicamente, los análisis posteriores.
- Existen modelos teóricos, que basándose en los resultados medios, pueden acotar las emisiones y servir como referencia a los valores medidos y, en algunos casos, ser una alternativa razonable de minimización de campañas de medidas de campo.

- Las emisiones se producen principalmente en la fabricación del clinker, tanto por las reacciones químicas que se originan, como por la quema de los combustibles fósiles.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DEL IMPACTO

4.1 – INTRODUCCIÓN

El capítulo anterior nos ha permitido hacer un análisis detallado de los inventarios de los cementos considerados en este estudio, que como se ha dicho, son los principales disponibles, públicamente, en la literatura técnica europea sobre este tema. Dicho análisis alcanza, tanto a los datos de entrada como a las salidas centradas en las emisiones al aire del sistema (CO_2 , SO_2 , NO_x y polvo). Para la evaluación de estas emisiones se han incorporado técnicas alternativas, con el fin de poder contrastar los resultados aportados por los inventarios utilizados, habiéndose comprobado, en general, la validez de esta vía.

En este capítulo, siguiendo la metodología del ACV, se presenta los resultados correspondientes a la etapa conocida como *evaluación del impacto*, de acuerdo con la recomendación de la ISO 14.040 [1987]. Esta etapa se desglosa en diferentes fases, con una primera de *clasificación* de la emisiones y una segunda de *caracterización* de cada categoría de impacto, donde se evalúan todas las cargas ambientales generadas por el sistema. Esta evaluación se realiza a través de una serie de *factores de caracterización* entre las emisiones individuales y los efectos producidos cuantificados mediante determinadas unidades de referencia (por ejemplo, masa de CO_2 equivalente en el caso del efecto invernadero).

Los estudios correspondientes a esta etapa son, evidentemente, la continuación de los considerados en el capítulo anterior y, consecuentemente, se realiza para la unidad en estudio (1 kg de cemento) de los diferentes inventarios de cementos incluidos, siguiendo con las principales emisiones el aire del sistema.

4.2 - IMPACTOS MEDIOAMBIENTALES ANALIZADOS

De los diferentes tipos de impactos medioambientales posibles, en este capítulo se analizan aquellos cuyos mecanismos medioambientales se desencadenan por una o más de las emisiones principales originadas en la producción del cemento. [CML, 1992; Wenzel et al., 1997]. Estas emisiones se han identificado en los inventarios del capítulo anterior, asociándose a la categoría de impacto y encuadrándola en un ámbito geográfico (global, regional y local), tal como se muestra en la tabla 4.1.

Ámbito del impacto	Categoría de impacto	Emisiones al aire del sistema			
		CO ₂	SO ₂	NO _x	Polvo
Global	Efecto Invernadero	1			
Regional	Acidificación		1	0,7	
	Eutrofización			1	
Local	Contaminación del aire		1		1

Tabla 4.1 – Categorías de impacto consideradas inicialmente para el estudio

En la citada tabla, indicando los *factores de caracterización* (por kilogramo de sustancia emitida) se correlacionan las emisiones del sistema frente a la categoría del impacto. Por otro lado, la división en ámbitos (o alcances) de los impactos ayuda al análisis posterior y a la toma de decisiones en función del punto de vista o situación de los técnicos o políticos correspondientes.

4.3 - ÁMBITO GLOBAL

4.3.1 - Efecto Invernadero

En la tabla 4.2. se presentan los resultados correspondientes a la caracterización con respecto al efecto invernadero de los cementos considerados en este estudio. De acuerdo con CML [1992] y Wenzel et al. [1997] los valores se expresan en gramos de CO₂ equivalentes por 1 kg de cemento producido.

En la misma se han incluido diferentes emisiones de gases: CO₂ (dióxido de carbono), N₂O (óxido nitroso) y CH₄ (metano) considerando los factores de caracterización que les

corresponden (1, 270 y 11 respectivamente). Asimismo se indica, en porcentaje, la contribución individual de cada uno de ellos, con el fin de conocer su importancia relativa en este efecto.

De los valores señalados en la citada tabla 4.2, se deduce que la influencia total del metano (CH₄) y del óxido nitroso (N₂O), en el efecto invernadero, es muy pequeña respecto a lo que significa la contribución del dióxido de carbono (CO₂), la cual se sitúa entre 98,8%-100%. Este resultado debe contribuir a la definición de las bases a establecer para un modelo nacional de análisis de ciclo de vida, en el que se contemple un equilibrio entre viabilidad de implantación y rigor científico (este punto se desarrolla en detalle en el capítulo 5).

Tipo	Cementos	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Suma
I	Cement Portland I	354,70 (100%)	0,00062 (0%)	-	354,70 (100%)
	Cement CH	810,00 (100%)	-	-	810,00 (100%)
	Cement N	813,00 (99,5%)	3,44 (0,5%)	0,60 (0%)	817,04 (100%)
	Portlandcement NL1	853,00 (100%)	-	-	853,00 (100%)
	Cement S	805,00 (99,6%)	3,3 (0,4%)	0,000039 (0%)	808,30 (100%)
	Cement SF1	780,00 (98,9%)	8,25 (1,1%)	0,00057 (0%)	788,25 (100%)
	Cement SF2	812,70 (98,8%)	9,93 (1,2%)	0,016 (0%)	822,65 (100%)
II	Cement Portland	918,30 (99,8%)	-	1,84 (0,2%)	920,14 (100%)
	Portlandcement A	586,00 (100%)	-	-	586,00 (100%)
	Portlandcement NL2	807,00 (100%)	-	-	807,00 (100%)
	Portlandcement NL3	289,00 (100%)	-	-	289,00 (100%)
III	Cement Hoogoven I	221,70 (100%)	0,00069 (0%)	-	221,70 (100%)
	Blast furnace slag cement	334,10 (98,9%)	-	3,85 (1,1%)	337,95 (100%)
	Blastfurnace slag cement NL1	212,00 (100%)	-	-	212,00 (100%)
	Blastfurnace slag cement NL2	134,00 (100%)	-	-	134,00 (100%)
IV	Cement Portlandash	692,90 (99,7%)	-	1,82 (0,3%)	694,72 (100%)

Tabla 4.2 – Caracterización de los distintos cementos con respecto al impacto global “Efecto Invernadero” (en gramos de CO₂ equivalente).

Por otro lado hay que resaltar la importante repercusión cuantitativa de las emisiones de CO₂. Las mismas, dependientes del tipo de cemento, alcanzan valores del orden de los 800 gramos de CO₂ emitidos en la producción de 1 kg de cemento del tipo I. Estos datos avalan la opinión del Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático [IPCC, 1996], que señala a la producción del cemento como una fuente emisora industrial de CO₂ relevante, y por lo tanto, significativa contribuyente en el efecto invernadero y sus consecuencias sobre el cambio climático de la Tierra.

Las variaciones de los resultados de la tabla 4.2 responden al tipo de cemento, en definitiva, a la cantidad de clinker en el mismo, ya que es el clinker el que más contribuye, tal como se ha visto en el capítulo anterior. Por otro lado, las variaciones de CO₂ totales pueden responder al tipo de recursos utilizados (principalmente, combustible).

Tal como se ha dicho, los cementos tipo I tienen una emisión del orden de 800 gramos, pudiéndose observar en la tabla 4.2. que el denominado *Cement Portland I* (354,70 gramos de CO₂ equivalentes) se aleja significativamente de este valor. Las diferencias pueden obedecer a que en el *Cement Portland I* (SimaPro) no se esté incluyendo parte de las emisiones de la producción del clinker, bien porque parte de ellas no se repercutan, por alguna razón, en el inventario citado, o bien por la definición de la propia estructura de los límites del sistema, ya que tal como señala Cembureau [1999], Holanda solamente dispone de 1 horno para producir clinker y de 3 plantas para producir cemento, lo que debería conducir a resultados muy parecidos. La diferencia con los resultados del *Portland Cement NLI* (Cembureau) refuerzan la explicación dada.

Los resultados con los demás tipos de cementos responden principalmente a las cantidades de clinker que tiene cada uno de ellos. Las inconsistencias de algunos de los resultados ya han sido analizadas en el capítulo anterior y responden a diversas razones: definición de los límites del sistema, errores numéricos y otros. En la gama de los cementos que incorporan elevados porcentajes de adiciones de escorias de horno alto o cenizas (por ejemplo, cementos del tipo III), las reducciones pueden alcanzar valores del 60 y del 70%, respecto a los resultados correspondientes a los cementos tipo I.

4.4 - ÁMBITO REGIONAL

Algunas de las emisiones de la producción de 1 kg de cemento tienen un ámbito regional, incluyendo en esta categoría de impactos, los correspondientes a la *Acidificación* y la *Eutrofización*. Las emisiones al aire que más contribuyen en este caso a estos impactos, tal como se ha señalado en la tabla 4.1 son: el dióxido de azufre (SO₂) y los óxidos de nitrógeno (NO_x); no obstante, de acuerdo con las salidas aportadas por los inventarios, se incluyen otras emisiones que influyen en este impacto, tales como: el ácido clorhídrico (HCl), el amoníaco (NH₃), el

nitrógeno total (N-tot) y la demanda química de oxígeno (DQO o COD), correspondientes a la matriz energética.

Para la evaluación se han tomado los factores de caracterización señalados en la tabla 4.3 obtenidos de CML, [1992] y SimaPro, [1997], en la que se desglosa cada emisión asociada al impacto. Las sustancias de referencia utilizadas son: para la acidificación, el dióxido de azufre (SO₂) y, para la eutrofización el compuesto fosfático (PO₄).

Emisión	Acidificación	Eutrofización
NH ₃ (amoníaco)	1,88	0,33
HF (ácido fluorhídrico)	1,60	--
HCL (ácido hidroclicóric)	0,88	--
NO ₂ o NO _x (óxido de nitrógeno)	0,70	0,13
SO ₂ o SO _x (dióxido de azufre)	1,00	--

Tabla 4.3 - Factores de caracterización utilizados en la acidificación y en la eutrofización

4.4.1 - Acidificación

Con relación a la categoría de impacto de la *acidificación*, el SO₂ constituye la emisión de referencia, por ello los resultados se expresan en masa de SO₂ equivalente. Estos resultados, correspondientes para todos los cementos estudiados, se presentan en la tabla 4.4, en la cual también se incluye el porcentaje de cada una de las emisiones en el valor total, con el fin de ver la repercusión relativa que tiene cada una de ellas.

Las principales emisiones de SO₂ y NO_x en la producción del cemento corresponden a los procesos energéticos, asociados a la quema de combustibles fósiles tanto en la producción del clinker (horno) como en los equipamientos mecánicos y vehículos de transporte. No obstante, existen otras vías, como es el caso de las emisiones de SO₂ en el empleo de las arcillas utilizadas como materia prima del clinker. En este caso, la fracción que no es retenida por las reacciones químicas de formación del clinker se emite a la atmósfera, lo que requiere sistemas de control mediante el empleo de filtros.

El total (en gramos de SO₂ equivalente) depende del tipo de cemento situándose entre 2 y 3 para los cementos de tipo I, entre 1 y 2 para los cementos tipo II y con valores inferiores a 1 para los cementos tipo III y IV (las diferencias de algunos cementos específicos se han analizado en el apartado 3.5.4.2 del capítulo 3). Estos resultados son lógicos por la alta dependencia de los mismos al contenido de clinker. Esta alta dependencia del contenido del clinker puede inducir a ciertas interpretaciones sesgadas a la hora de hacer el análisis, ya que alguien podría sugerir que

la importación del clinker, no tiene efectos regionales, lo cual es falso, simplemente se traslada los efectos a otras zonas.

Tipo	Cementos	SO₂	NO_x	HCl	NH₃	Suma
I	Cement Portland I	0,43 (39%)	0,67 (61%)	0,000019 (0%)	-	1,10 (100%)
	Cement CH	0,60 (30%)	1,40 (70%)	-	-	2,00 (100%)
	Cement N	0,67 (31%)	1,46 (69%)	-	0,000010 (0%)	2,13 (100%)
	Portlandcement NL1	0,08 (4%)	1,81 (96%)	-	-	1,89 (100%)
	Cement S	0,45 (25%)	1,36 (75%)	-	-	1,81 (100%)
	Cement SF1	0,63 (20%)	2,59 (80%)	-	-	3,22 (100%)
	Cement SF2	1,33 (39%)	2,07 (61%)	-	-	3,40 (100%)
II	Cement Portland*	1,16 (35%)	2,17 (65%)	-	0,00036 (0%)	3,33 (100%)
	Portlandcement A	0,12 (10%)	1,10 (90%)	-	-	1,22 (100%)
	Portlandcement NL2	0,09 (4%)	2,07 (96%)	-	-	2,16 (100%)
	Portlandcement NL3	0,98 (67%)	0,49 (33%)	-	-	1,47 (100%)
III	Cement Hoogoven I	0,51 (59%)	0,35 (41%)	0,000015 (0%)	-	0,86 (100%)
	Cement blast furnace slag*	0,58 (43%)	0,77 (57%)	-	0,00076 (0%)	1,35 (100%)
	Blastfurnace slag cement NL1	0,03 (5%)	0,60 (95%)	-	-	0,63 (100%)
	Blastfurnace slag cement NL2	0,43 (61%)	0,28 (39%)	-	-	0,71 (100%)
IV	Cement Portlandash*	0,90 (36%)	1,63 (64%)	-	0,00025 (0%)	2,53 (100%)

Cementos que en sus inventarios también incluyen cantidades despreciables de Ácido Fluorhídrico (HF)

Tabla 4.4.– Caracterización de los distintos cementos con respecto al impacto regional “Acidificación” (en gramos de SO₂ equivalente)

En los resultados desglosados de la citada tabla 4.4 se observa los elevados porcentajes que, en general, significan las emisiones de NO_x (en gramos de SO₂ equivalente) en la acidificación total, resultantes del uso de combustibles fósiles en el horno de clinker, maquinaria y vehículos mecánicos. Las aportaciones de las emisiones de HCl y NH₃ son prácticamente de un orden de magnitud despreciable (en microgramos). Llama la atención que estos resultados corresponden, únicamente a cementos del inventario de SimaPro (a excepción del Cement N del inventario de Cembureau) lo que refuerza una vez más las diferencias de tratamiento y límites del sistema de cada inventario, tal como se ha puesto de manifiesto en el capítulo anterior.

4.4.2 – Eutrofización

La eutrofización, como es conocido, es consecuencia de las emisiones de los óxidos de nitrógeno (NO_x) a través del enriquecimiento de nutrientes en las reservas acuáticas y suelos agrícolas. En la fabricación del clinker y del cemento, se emiten óxidos de nitrógeno (NO_x), cuyo origen radica, principalmente, en el tipo de combustible utilizado para la obtención del clinker y la producción de energía eléctrica (Véase 3.5.3 capítulo 3). En el sistema en estudio (fabricación de 1 kg de cemento) existen otras emisiones relevantes en este caso, tales como el amoníaco (NH_3), el nitrógeno total (N-tot) y la demanda química de oxígeno (DQO o COD).

En la tabla 4.5. se presentan los resultados de la caracterización (en miligramos de PO_4 equivalentes) y los porcentajes que cada emisión representa sobre el total. En ella puede verse que la fuente principal está en las emisiones de NO_x , pudiéndose considerar como despreciables en la caracterización de este impacto medioambiental, el resto de las emisiones consideradas.

Los resultados recogidos en citada la tabla 4.5, como era de esperar, dependen del tipo de cemento, en definitiva, del contenido del clinker existente en el mismo. Así para los cementos tipo I, el resultado de la caracterización es del entorno de 250 a 350 miligramos de PO_4 equivalentes, mientras que para los cemento tipo II, este entorno se sitúa entre 125 y 250, y para los cemento tipo III, entre 50 y 125.

Las diferencias de algunos cementos específicos responden a otros tipos de errores o definiciones de límites del sistema, tal como se ha visto en el capítulo anterior. Así, a manera de ejemplo, el Cement Portland I, en el que se detectaron fallos en su inventario ya que la producción del clinker no la consideran entre los límites del sistema, y como consecuencia omiten una considerable cantidad de NO_x resultante de la quema del combustibles fósiles en el horno de clinker, el resultado de 124,38 miligramos de PO_4 equivalente está por debajo del rango señalado, para los cementos tipo I.

Estos resultados vienen a representar que una planta de cemento que produzca 1 millón de toneladas al año, aporta una carga de fósforo del orden de 0,5 kilogramos por hectárea (considerando un área de influencia de 4.000 km^2), lo cual está en línea con lo expresado por la European Environmet Agency [2000] para los países industrializados del oeste de Europa.

4.5 – ÁMBITO LOCAL

Las pequeñas partículas de polvo en suspensión, existentes en el aire, pueden causar daños irreversibles en los aparatos respiratorios de los humanos y de otros seres vivos. Estos efectos se incluyen en la categoría de impacto denominada *Contaminación de invierno*. Los efectos de

estas partículas se incluyen en el grupo de impactos de ámbito local, referido como *Contaminación del aire* por partículas. Entre estas partículas se consideran las correspondientes al SO₂, al polvo y al hollín (restos de combustión).

Tipo	Cementos	NO _x	NH ₃	N-tot	COD	Suma
I	Cement Portland I	124,38 (100%)	-	-	-	124,38 (100%)
	Cement CH	260,00 (100%)	-	-	-	260,00 (100%)
	Cement N	271,70 (100%)	0,002 (0%)	0,023 (0%)	-	271,70 (100%)
	Portlandcement NL1	335,40 (100%)	-	-	-	335,40 (100%)
	Cement S	252,20 (100%)	-	-	-	252,20 (100%)
	Cement SF1	481,00 (100%)	-	0,029 (0%)	0,010 (0%)	481,04 (100%)
	Cement SF2	383,50 (100%)	0,021 (0%)	0,014 (0%)	0,0049 (0%)	383,54 (100%)
II	Cement Portland	403,01 (100%)	0,060 (0%)	-	-	403,07 (100%)
	Portlandcement A	204,10 (100%)	-	-	-	204,10 (100%)
	Portlandcement NL2	383,50 (100%)	-	-	-	383,50 (100%)
	Portlandcement NL3	91,78 (100%)	-	-	-	91,78 (100%)
III	Cement Hoogoven I	65,86 (100%)	-	-	-	65,86 (100%)
	Cement blast furnace slag	142,48 (100%)	0,13 (0%)	-	-	142,61 (100%)
	Blastfurnace slag cement NL1	110,50 (100%)	-	-	-	110,50 (100%)
	Blastfurnace slag cement NL2	51,87 (100%)	-	-	-	51,87 (100%)
IV	Cement portlandash	302,38 (100%)	0,040 (0%)	-	-	302,42 (100%)

Tabla 4.5 - Caracterización de los distintos cementos con respecto al impacto regional "Eutrofización" (en miligramos de PO₄ equivalente)

En la tabla 4.6. se presentan los resultados correspondientes a cada uno de los cementos estudiados. En la misma se ponen cada una de las emisiones (en gramos de polvo equivalente) y el total, habiéndose tomado lo mismo valor del factor de caracterización para todas las emisiones y éste igual a 1. Asimismo se presentan los porcentajes relativos de cada uno de los tipos de partículas emitidas.

Tipo	Cementos	Polvo	SO ₂	Hollín	Suma
I	Cement Portland I	10,00 (96%)	0,43 (4%)	0,0092 (0%)	10,43 (100%)
	Cement CH	0,30 (33%)	0,60 (67%)	-	0,90 (100%)
	Cement N	0,18 (21%)	0,67 (79%)	-	0,85 (100%)
	Portlandcement NL1	7,50 (99%)	0,08 (1%)	-	7,58 (100%)
	Cement S	0,16 (26%)	0,45 (74%)	-	0,61 (100%)
	Cement SF1	0,39 (38%)	0,63 (62%)	-	1,02 (100%)
	Cement SF2	0,33 (20%)	1,33 (80%)	-	1,66 (100%)
II	Cement Portland	0,24 (17%)	1,16 (83%)	-	1,40 (100%)
	Portlandcement A	0,17 (59%)	0,12 (41%)	-	0,29 (100%)
	Portlandcement NL2	0,19 (68%)	0,091 (32%)	-	0,28 (100%)
	Portlandcement NL3	79,60 (99%)	0,97 (1%)	-	80,57 (100%)
III	Cement Hoogoven I	10,00 (95%)	0,51 (5%)	0,010 (0%)	10,52 (100%)
	Cement blast furnace slag	0,084 (13%)	0,58 (87%)	-	0,66 (100%)
	Blastfurnace slag cement NL1	0,14 (82%)	0,031 (18%)	-	0,17 (100%)
	Blastfurnace slag cement NL2	88,60 (99,5%)	0,43 (0,5%)	-	89,03 (100%)
IV	Cement Portlandash	0,18 (17%)	0,90 (83%)	-	1,08 (100%)

Tabla 4.6.- Caracterización de los distintos cementos, con respecto al impacto local Contaminación de invierno (en gramos de SPM equivalente)¹

Los resultados expuestos en la tabla 4.6 muestran, por un lado, que la significación de las emisiones de hollín es despreciable y, por otro lado, que existe una gran disparidad de la influencia de SO₂ y polvo (en porcentaje). Ello puede ser reflejo de que en los inventarios no se definen bien los límites de los diferentes subsistemas y, consecuentemente, se incorporen resultados de unos en otros, tal como se ha reiterado con anterioridad en el apartado 3.3 del capítulo 3.

Si se consideran valores absolutos, hay que destacar que los cementos holandeses: Cement Portland I, Portlandcement NL1, Portlandcement NL3, Cement Hoogoven I y Blast furnace slag cement NL2 superan en varios órdenes de magnitud, los valores correspondientes a los otros cementos, los cuales se sitúan en valores de 0,25 a 1,50 gramos de polvo equivalente por kilogramo de cemento. Estos resultados pueden responder a errores en los inventarios, lo que

¹ SPM sigla del término en inglés "Suspended Particle Matter"

nuevamente implicaría la necesidad de una buena estructuración de los mismos, o bien, a que en las fábricas de estos cementos, los filtros no son correctos, lo que parece poco probable, debido a la alta sensibilidad medioambiental de Holanda. En cualquier caso, este punto debe ser de especial atención en una definición metodológica de los inventarios a utilizar.

4.6 - OTROS IMPACTOS CARACTERIZADOS A PARTIR DE EMISIONES MENORES

Los resultados presentados en el capítulo 3, pusieron de manifiesto la existencia de otros tipos de emisiones que, aunque de valores menores, pueden tener repercusión sobre determinados tipos de impactos, considerados como significativos. En este apartado se estudian algunos de ellos, ya sea de ámbito regional, como la *Formación fotoquímica de ozono*, conocida también por *Contaminación de verano*, o ya sea de ámbito local como: *Carcinógenos y Metales pesados*. Para la caracterización de estos impactos se han considerado los factores de caracterización dados en la tabla 4.7.

Emisión	Carcinógenos	Formación de ozono	Metales pesados
Aldehídos	--	0,443	--
Arsénico	0,044	--	--
Benceno	0,00044	0,189	--
Benzo(a)pyreno	1,0	--	--
Cd	--	--	50
Cr	--	--	0,2
CH4 (metano)	--	0,007	--
CxHy	--	0,398	--
Etilbenceno	0,000044	--	--
Fenol	--	0,761	--
Flúoretano	1,0	--	--
Hg	--	--	1,0
Ni	0,0044	--	--
PAH's	1,0	0,761	--
Pb	--	--	1,0
VOC	--	0,398	--

Tabla 4.7- Factores de caracterización para otras emisiones incidentes en las categorías de impacto: Carcinógenos, Formación fotoquímica de ozono, y Metales pesados

Para relativizar el tema con relación a las fábricas de cemento, hay que señalar que estas emisiones proceden, principalmente, de los procesos energéticos, en particular de la producción de electricidad y de la obtención del combustible primario (crudo de petróleo, carbón, etc.), por lo tanto, a pesar de que sus cargas ambientales se imputan, en principio, dentro de los límites del

sistema de producción de cemento, su ámbito de actuación afecta a entornos, en general, alejados de la planta cementera.

Asimismo, en esta tabla se presentan considerados, habiéndose tomado como referencia los siguientes: miligramos C_2H_4 equivalentes para *Formación fotoquímica de ozono (Contaminación de verano)*, nanogramos de B(a)P equivalente para *Carcinógenos* y nanogramos de Pb equivalente para *Metales pesados*.

4.6.1 – Formación fotoquímica de ozono

El impacto *Formación fotoquímica de ozono* (contaminación de verano) depende de la presencia en la toposfera de sustancias fotoquímicas oxidantes como: los compuestos orgánicos volátiles (VOC) o el monóxido de carbono (CO). La actuación de la radiación solar sobre estas sustancias da lugar a reacciones entre los compuestos fotoquímicos oxidantes y los radicales hidroxilos (OH) con presencia de NO_x , cuyo resultado es la formación de ozono (O_3).

En la tabla 4.8 se presentan los resultados de este impacto medidos en miligramos de etileno (C_2H_4) equivalente por kilogramo de cemento. En ella puede apreciarse una elevada dispersión de dichos resultados, que no permiten hacer correlación alguna con el tipo de cemento, ni definir valores representativos. Ello, independientemente de la tan citada explicación acerca de los límites del sistema o subsistemas, puede obedecer, principalmente, a los combustibles utilizados en la fabricación del clinker, que pueden introducir agentes que conduzcan a este tipo de emisiones.

En la tabla puede verse que hay cementos que no aportan la información correspondiente a la *formación de ozono* (contaminación de verano) lo cual cuestiona, una vez más el rigor de alguno de sus inventarios. Por otro lado, los cementos Cement SF1 (367 miligramos de etileno C_2H_4 equivalentes por kilogramo de cemento) y Cement blast furnace slag (364 miligramos de C_2H_4 equivalentes) tienen un orden de magnitud muy superior al resto de los cementos, sin que se pueda señalar un valor representativo de los mismos. Estos resultados, tal como se ha dicho están asociados en buena medida a los procesos energéticos del sistema, por lo que hay que insistir en la importancia de una adecuada definición de la matriz energética suministradora de energía al sistema de producción.

4.6.2 – Metales pesados y carcinógenos

Se consideran *Metales pesados*, todos aquellos cuyo peso específico es mayor que el del titanio ($4,51\text{gr/cm}^3$). Los mismos se encuentran, en cantidades pequeñas, en materias primas como crudo de petróleo, rocas, carbón, etc. Ahora bien no todos los metales pesados tienen efectos perjudiciales para la salud y, los dañinos, no todos tienen la misma repercusión, por lo

que se requiere el empleo de los factores de caracterización recogidos en la tabla 4.7, anteriormente presentada. La unidad de referencia considerada es el nanogramo de plomo (Pb) equivalente.

Tipo	Cementos	Regional	Local	
		Formación del ozono (mg C ₂ H ₄ equiv.)	Cancerígenos (mg B(a)P equiv.)	Metales pesados (mg Pb equiv.)
I	Cement Portland I	14,90	0,000021	0,0058
	Cement CH	-	0,0011	4,01
	Cement N	53,50	0,00034	0,53
	Portlandcement NL1	1,19	-	-
	Cement S	53,50	0,00034	0,53
	Cement SF1	367,00	0,0046	0,11
	Cement SF2	6,33	0,0014	0,38
II	Cement Portland	174,00	-	-
	Portlandcement A	95,50	0,00015	0,12
	Portlandcement NL2	-	-	0,013
	Portlandcement NL3	8,68	-	-
III	Cement Hoogoven I	12,70	0,000022	0,0059
	Cement blast furnace slag	363,00	-	-
	Blastfurnace slag cement NL1	-	-	0,013
	Blastfurnace slag cement NL2	3,74	-	-
IV	Cement Portlandash	182,00	-	-

Tabla 4.8 - Caracterización de los distintos cementos con respecto a otras categorías de impactos medioambiental consideradas.

Los resultados de los inventarios conducen a que el origen de estas emisiones se sitúa, otra vez, en los sistemas energéticos, ya que en los mismos, no hay indicios de que su origen esté en la materia prima del cemento. La gran dispersión de los resultados (órdenes de magnitud muy diferentes) no permite asociar un valor representativo del cemento (independientemente del tipo), ya que depende del tipo de los combustibles utilizados, tanto en el horno de clinker como en la matriz energética.

Este tipo de impacto sirve como herramienta de verificación de límites normativos, si bien no resulta adecuada para toma de decisiones medioambientales de selección de un cemento respecto a otro. En cualquier caso llama la atención el resultado correspondiente al Cement CH (4,01 miligramos de Pb equivalente por kilogramo de cemento), ya que alcanza un valor 70

veces superior al siguiente. Este resultado, o bien es un error del inventario no detectado, o bien es consecuencia del empleo de un combustible con altos contenidos de metales pesados.

Con respecto a los *Cancerígenos* se pueden hacer los mismos comentarios generales que los expresados para los *Metales pesados* en cuanto al origen de las emisiones. Asimismo, se observa una importante dispersión de los resultados, con órdenes de magnitud claramente diferenciados, por lo que no se puede definir unos valores representativos. Lo que sí se podrá hacer es que el impacto sea menor que un valor normativo de referencia.

4.7 - CONCLUSIONES

La caracterización de los impactos ambientales originados en la fabricación de 1 kilogramo de cemento de distintos tipos, realizada de acuerdo con la metodología del ACV, permite extraer las siguientes conclusiones:

- La caracterización ha puesto de manifiesto, nuevamente, los errores e indefiniciones de los límites del sistema o subsistemas ya evidenciados en el capítulo anterior. Ello es lógico ya que la caracterización es una fase posterior de las entradas al sistema y las salidas del mismo, reflejadas en las emisiones. Ello incide en la necesidad de crear un inventario bien definido, en el que los límites del sistema y subsistemas estén bien estructurados
- La contribución del dióxido de carbono (CO_2) en el efecto invernadero se sitúa entre el 98,8% y el 100% del total, es decir, es el principal causante del mismo. La influencia de otros gases (metano, CH_4 , óxido nitroso, N_2O), es mucho más pequeña. Por otro lado, las emisiones de CO_2 son cuantitativamente importantes y se sitúan, por ejemplo, en el orden de los 800 gramos de CO_2 emitidos en la producción de 1 kg de cemento del tipo I, lo cual justifica que la producción de cemento sea una fuente relevante de CO_2 , y por lo tanto, del efecto invernadero.
- La acidificación la producen, fundamentalmente, las emisiones de SO_2 y NO_x . El total (en gramos de SO_2 equivalente) depende del tipo de cemento (contenido de clinker) situándose entre 2 y 3 para los cementos de tipo I, entre 1 y 2 para los cementos tipo II y con valores inferiores a 1 para los cementos tipo III y IV. Las emisiones de NO_x son las que más contribuyen a la acidificación, mientras que las de HCl y NH_3 producen un efecto prácticamente despreciable.
- La fuente principal en el caso de la eutrofización está en las emisiones de NO_x , pudiéndose considerar como despreciables en la caracterización de este impacto

medioambiental, el resto de las emisiones consideradas. Para cementos tipo I se obtienen del orden de 250 a 350 miligramos de PO_4 equivalentes, mientras que para los cemento tipo II, este entorno se sitúa entre 125 y 250, y para los cemento tipo III, entre 50 y 125. Estos resultados vienen a representar que una planta de cemento que produzca 1 millón de toneladas al año, aporta una carga de fósforo del orden de 0,5 kilogramos por hectárea (considerando un área de influencia de 4.000 km^2).

- En el caso de la contaminación de invierno (partículas pequeñas de polvo en suspensión en el aire), los principales contribuyentes son el SO_2 , el polvo y el hollín. Los resultados muestran, por un lado, que la significación de las emisiones de hollín es despreciable y, por otro lado, que existe una gran disparidad de la influencia de SO_2 y polvo (en porcentaje).
- En los casos de la formación fotoquímica de ozono (contaminación de verano), los metales pesados y los carcinógenos, los resultados son muy variables dependiendo de los combustibles y materias primas empleados. Cabe indicar que, en muchos de estos casos, las emisiones proceden, en buena medida, de procesos energéticos y, en particular, de la producción de electricidad y de la obtención del combustible primario (crudo de petróleo, carbón, etc.), por lo que, a pesar de que sus cargas ambientales se imputan, en principio, dentro de los límites del sistema de producción de cemento, su ámbito de actuación afecta a entornos, en general, alejados de la planta cementera.

CAPÍTULO 5

BASES PARA UN MODELO NACIONAL DE INVENTARIOS DE CEMENTOS

5.1 – OBJETO

En los capítulos anteriores se ha puesto de manifiesto, por un lado, la importancia de los inventarios en la precisión de los resultados del análisis del ciclo de vida de 1 kilogramo de cemento (en diferentes tipos de cemento) y, por otro, la necesidad de una adecuada definición de los límites del sistema o subsistemas en los que se realiza el análisis.

Tal como se ha expuesto, los inventarios analizados proceden de dos fuentes principales (SimaPro y Cembureau), alcanzando a diferentes tipos de cementos, producidos, principalmente, en países del norte de Europa. En esas bases internacionales no existen datos de los cementos producidos en España.

No se trata ahora de analizar las razones de esas ausencias, si bien cabe señalar la necesidad del sector cementero en avanzar en esa dirección; si no de sentar las bases de futuro para un modelo nacional de inventario de cementos. Este modelo debería ser el resultado de un trabajo de consenso entre todos los agentes implicados en el proceso (productores, investigadores, consumidores, etc.).

El presente capítulo tiene por objeto presentar una propuesta del modelo nacional de inventarios de cementos, base de partida de los debates posteriores entre los sujetos intervinientes en el proceso. En esa propuesta se persigue por un lado, el rigor científico, que haga creíble los resultados y, por otro lado, la factibilidad de su implantación, sin levantar recelos por parte de algunos de los sujetos. Ello será factible a través de los aspectos metodológicos, los cuales se harán de acuerdo con la normativa internacional respecto a temas medioambientales del análisis de ciclo de vida. [ISO 14.040, 1997].

5.2 – CONSIDERACIONES SOBRE LA CREACIÓN DE UN MODELO NACIONAL

5.2.1 - Consideraciones generales del sector

La necesidad de la creación de un modelo nacional de inventario para el análisis de ciclo de vida de los productos en base cemento, no debe plantearse de forma reactiva (por ejemplo: como consecuencia de que exista en otros países) sino de forma activa, para dar respuesta a una sociedad cada vez más sensibilizada en temas medioambientales.

Así, en primer lugar, hay que recordar algunos de los datos más significativos del sector con objeto de poder transmitir los mismos a la sociedad, para dar a entender la necesidad del estudio. La producción mundial de cemento en el año 1995 fue de 1.420.000 toneladas [CEMBUREAU, 1999], distribuyéndose geográficamente, según los datos de la tabla 5.1.

Continente/País	Producción
China	30 %
Otros países asiáticos	23 %
Unión Europea	12 %
Otros países europeos	6 %
Japón	7 %
E.E.U.U.	5 %
Otros países de América	8 %
Países antigua URSS	4 %
África	4 %
Oceanía	1 %

Tabla 5.1 - Porcentaje de producción de cemento respecto al total, según países o continentes [CEMBUREAU, 1999]

En esta tabla puede apreciarse que la Unión Europea representa el 12 %, lo que significa una producción de 170.400 toneladas, de las cuales 28.491 fueron producidas en España, tal como puede observarse en la tabla 5.2. Esta cifra representa el 2 % de la producción mundial y

sitúa a España en una de las primeras posiciones a nivel europeo, tanto en producción como en consumo, siendo un país exportador.

Países	Producción Año 1995 (miles de t.)	Consumo Año 1995 (miles de t.)	Número de plantas de cemento	
			con horno de clinker	solamente molienda
Alemania	33.302	38.486	50	20
Austria	3.777	4.987	11	1
Bélgica	8.223	5.735	5	3
Dinamarca	2.051	1.185	1	-
España	28.491	25.460	37	5
Francia	20.697	19.822	38	5
Finlandia	907	1.089	2	-
Grecia	14.480	6.851	8	-
Holanda	3.180	5.300	1	2
Irlanda	1.730	1.860	2	-
Italia	34.019	34.639	64	29
Luxemburgo	708	511	1	1
Portugal	8.123	7.886	6	1
Reino Unido	11.805	12.740	23	1
Suecia	2.539	1.505	3	1
Total	173.031	168.056	252	68

Tabla 5.2 - Datos relativos a la fabricación de cemento en diversos países [CEMBUREAU, 1999]

En la citada tabla 5.2 se muestra, además de la producción de cemento en el año 1995 en diversos países europeos, el consumo en los mismos, así como el número de plantas de cemento, ya sean con producción de clinker o no. Evidentemente, existen datos parciales más recientes (<http://www.oficemen.com/defint.htm>) en los que se señala que la producción española de cemento entre mayo de 1999 y mayo de 2000 fue de 36,7 millones de toneladas, representando un crecimiento por encima de los 22 % respecto al año de 1995; no obstante, el cambio de números no modifica la línea argumental que se realiza a continuación.

Un primer dato que destaca, en la citada tabla, es el carácter estratégico que todos los países conceden al sector del cemento, ya que incluso países pequeños tienen su producción propia (p. ej.: Luxemburgo). Dentro del contexto mundial, la producción total de cemento de los países europeos en ese año representaba un 12 %, tal como se ha mostrado en la tabla 5.1.

Otro dato a destacar, es el número de fábricas de cemento, en especial, las que disponen de horno de clinker, por ser este un subsistema importante en los aspectos de impactos ambientales. Así, los principales productores son: Italia con 64 plantas, Alemania con 50, Francia con 38, España con 37 y el Reino Unido con 23 y, si recordamos el origen de los inventarios recogidos en los capítulos anteriores, se observa que los productores principales no han aportado información a los mismos. Esta situación puede ser reflejo, entre otras cosas, de las mayores dificultades de poner de acuerdo a numerosos fabricantes, con intereses contrapuestos, de realizar un inventario y darlo a la luz pública. Ello tiene menor probabilidad de producirse cuando el número de productores es muy reducido como corresponde a los países que han aportado los inventarios en las bases estudiadas. En cualquier caso existe una tendencia de cambio en esta dirección, dentro del grupo de países antes citado.

Con relación a España, el carácter exportador que se refleja en la tabla (producción mayor que consumo) y que tradicionalmente ha mantenido el sector [Palomar, 1998], hay que tenerlo presente, lógicamente, en todos los ámbitos de impacto, sí bien de manera más directa, desde el punto de vista del ciudadano, en los de carácter regional y local.

Desde el ámbito global, el efecto más popularizado es el efecto invernadero consecuencia de la emisión del CO₂. En su evaluación existen diferentes fuentes, si bien aquí se utilizará la presentada por el Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC, 2000) <http://cdiac.esd.ornl.gov>. En los trabajos del citado centro, que alcanzan a todos los países del mundo y a unas series históricas muy amplias (en algunos casos de más de 2 siglos), se evalúan las emisiones de CO₂ que resulten de la quema de combustibles fósiles para fines energéticos y las resultantes de la producción del cemento. Para el citado año 1995, las emisiones totales mundiales de CO₂, fueron de 6.386 millones de toneladas métricas de carbón equivalente (Marland y Boden, 2000). De esta cifra, la aportación española según la citada fuente fue de 63,5 millones de toneladas métricas de carbón equivalente, lo cual representa del entorno al 1 % de la producción mundial.

La parte imputable al cemento, en las cifras mundiales es de 196 millones de toneladas métricas de carbón equivalente, lo que constituye en 3 % del total; mientras que en las cifras españolas, las emisiones son de 3,42 millones de toneladas métricas de carbón equivalente, lo que constituye un 5,4 % del total de las emisiones españolas del citado año. Este porcentaje tiene cierta relevancia, dentro del sector industrial español, por lo que se entiende debe constituir una motivación para la profundización en el desarrollo de los inventarios del sector. Por otro lado, refleja una mayor repercusión relativa del sector español del cemento.

Por último, independientemente de los valores más globales está la percepción del ciudadano, el cual aún mantiene una imagen negativa desde el punto de vista medioambiental, asociada a las capas de polvo que antiguamente se depositaban en las zonas próximas a las

fábricas de cemento. Ello lleva en algunas imágenes periodísticas a asociar los aspectos negativos con imágenes grises representadas por el cemento. Así pues si se quiere cambiar esa imagen y mejorar la percepción social del ciudadano es necesario la realización de los inventarios para, con posterioridad a través de herramientas tipo Análisis Ciclo de Vida, evaluar medioambientalmente el cemento y poder disponer de argumentos de convicción hacia el usuario y las administraciones.

5.2.2 – Características técnicas

Si tal como se ha mostrado en el apartado anterior, pueden existir razones de tipo estratégico para la realización de unos inventarios en el sector, conviene ahora enfatizar en las características técnicas que deben guiar el mismo, para que sea asumible por parte de todos los productores y creíble por parte de los interlocutores.

Asimismo, ante las dificultades que pueda suponer una implantación compleja y de golpe de unos inventarios, hay que pensar en una política escalonada de implantación de los mismos en los diferentes productores de cemento existentes en España y en cada una de sus plantas, que como se ha visto en la tabla 5.2, el número es significativo.

Con base a estas consideraciones y a las experiencias negativas expuesta en los capítulos anteriores sobre los límites del sistema, a continuación se señalan las características principales que se entiende, debería tener el modelo nacional de inventarios del sector del cemento:

- *Internacionalización:*
El inventario debe ser compatible con los existentes en el ámbito mundial, principalmente, europeo, para que puedan ser utilizables en un marco más amplio que el nacional, en una economía cada vez más globalizada.
- *Facilidad:*
Para los estudios estándar deberían definirse unas emisiones principales, en aras a no aumentar en exceso los datos y registros a medir en las fábricas de cemento, ya que ello conllevaría reticencias de las personas y costes excesivos. No obstante, puede establecerse algún sistema de registro de otras emisiones, de forma esporádica, que pueda ser indicativo de algún factor de interés.
- *Rigor:*
Los datos, aunque puedan ser limitados en número, deben ser representativos con una elevada precisión. Asimismo, el método de trabajo en la gestión de los mismos debe ser riguroso de forma tal que sea científicamente admisible y que puedan ser utilizados en estudios comparativos con otros materiales de construcción.

- *Integrable:*

Esta característica debe interpretarse, no sólo desde el punto de vista de integrable en otros inventarios del sector (en el ámbito mundial) sino, desde otros puntos de vista, tal como: sistemas de gestión de la construcción, inventarios de otros materiales, etc.,.

- *Confidencialidad:*

Los datos obtenidos de cada una de las plantas de cemento deben permitir obtener características representativas (medias, desviaciones, etc.) de los cementos tipo para utilizar en sistemas comparados con otros materiales o para integrar en procesos globales de gestión de la construcción. Ahora bien, debe mantenerse la confidencialidad de los datos particulares para que no generen tensiones internas en el sector o sea vía de problemas externos.

5.2.3 - Situación en otros inventarios

Antes de definir los parámetros a estudiar en un modelo nacional de inventarios de cemento, parece conveniente analizar los modelos existentes. Por ello, en lo que sigue se hace una revisión de los parámetros de entradas (materias primas, combustibles y energía) y salidas (emisiones) considerados en fuentes de gran significación: CEMBUREAU [1999], VDZ [2000] y EPER [2000]. Así, en la tabla 5.3 se presentan las entradas al sistema dadas por CEMBUREAU y VDZ mientras que en la tabla 5.4. se dan las salidas de esas fuentes y de EPER.

En la citada tabla 5.3 puede apreciarse la forma diferente de abordar los parámetros de entrada. Así, con relación a las materias primas, CEMBUREAU las considera en función del origen de las mismas (extraídas, recicladas, auxiliares), mientras que VDZ las clasifica a partir de los aportes minerales que realizan al cemento. Ello refleja la falta de una metodología común de abordar el tema. Eso mismo puede apreciarse tanto con relación al consumo de agua, el cual es explícito en CEMBUREAU, mientras que no lo es en VDZ; como con relación al transporte, el cual es considerado en las entradas de CEMBUREAU y, no lo es, en las entradas de VDZ.

Esas mismas diferencias pueden apreciarse en el tema de los combustibles, los cuales se tratan en CEMBUREAU de forma muy general, mientras que VDZ los refiere de forma más detallada. Ello puede responder a que CEMBUREAU tiene tendencia, por las propias características de la organización, a tratar con valores medios mientras que VDZ al tratar de los cementos producidos en Alemania, ha preferido referirlos a cada una de las plantas. Esta forma de ver los temas puede ser interesante a la hora de plantear un modelo nacional y, consecuentemente, podría hablarse en términos medios si se trata de referir a otros ámbitos o

materiales, pero dejando la puerta abierta a introducir un desglose para los estudios de los diferentes cementos de cada planta teniendo en cuenta las características propias de las mismas.

El tema de energía, en las dos fuentes citadas, prácticamente sólo se refiere a la misma sin dar más datos. Ello hace pensar en que utilizan un valor medio de la matriz energética de cada país, sin introducir características específicas que pudiesen plantearse en una determinada planta de cemento. A la hora de plantear el modelo nacional, puede seguirse el camino del valor medio de la matriz energética nacional, tal como se presenta más adelante en el apartado 5.4.4, o bien, dejar la posibilidad de la existencia de unas características propias de una planta, en los estudios específicos de cada uno de los cementos en cada una de ellas.

Por otro lado en la citada tabla 5.4. se presentan las emisiones planteadas en las fuentes de EPER (del inglés European Pollutant Emission Register) [2000], CEMBUREAU [1999] y VDZ [2000]. Las emisiones al aire originadas en la fabricación del cemento, EPER, las recoge en la categoría 3.1 del anexo I de la IPPC (del inglés Integrated Pollution Prevention and Control), correspondiente a instalaciones para la producción de clinker de cemento en hornos rotatorios con una capacidad de producción superior a 500 t/día, o cal en hornos rotatorios con una capacidad de producción superior a 50 t/día, o en otros hornos con una capacidad de producción superior.

Hay que resaltar que en las emisiones hay una notable coincidencia en los parámetros considerados. Las diferencias radican, por un lado, en el mayor o menor número de metales pesados incluidos (en EPER se consideran 8 mientras que en CEMBUREAU y VDZ se toman 13 y 15, respectivamente). Por otro lado, en las emisiones a la atmósfera cada fuente introduce algún factor específico de menor rango. Por último hay que señalar que CEMBUREAU, incluye asimismo, las emisiones tanto al agua como al suelo, las cuales no están contempladas en las otras fuentes.

5.3 - ESTUCTURACIÓN GENERAL DEL PROCESO CONSTRUCTIVO

5.3.1 - El ciclo de vida del proceso constructivo

La visualización del proceso constructivo en un sentido amplio puede hacerse, a través de un ciclo de vida como el representado por Aguado y Casanova, [1997] en la figura 2.4 del capítulo 2. En ella se integran la construcción y desconstrucción en un mismo marco unitario. Ahora bien, en ella se reflejan las etapas principales, situándose en primer lugar la planificación, la cual debe alcanzar, tanto a la construcción como a la desconstrucción. Con posterioridad, en el bloque de construcción, se sitúa la etapa de materialización, englobando en ella las fases principales de proyecto, ejecución y materiales (suministros), cerrándose el bloque, con la etapa de gestión u uso de la obra.

CEMBUREAU			VDZ			
Materiales			Materias primas			
Extraídos	para la fabricación del clinker	Aportadores de calcio (caliza Marga, etc.)	Ca	Caliza / marga / tiza Otros, como: •Lodos calizos de tratamientos de aguas •Hidrato cálcico y Cloruro Cálcico •Granulado hormigón poroso •Residuos calizos industriales		
		Materiales arcillosos con Si, Al y Fe				
	para la fabricación del cemento	Yeso y anhidrita			Si	Arena y Arena usada de fundición
		Esquistos calcinados			Si-Al	Arcilla / Bentonita / caolinita Residuos de la preparación del carbón
		Caliza				
Puzolana						
Otros						
Recuperados	para la fabricación del clinker	Con contenido de Ca, Si, Fe, Al. Reemplazan materias primas naturales	Fe	Mineral de hierro Otros materiales de la industria siderúrgica: •Pirita tostada / Cascarrilla de laminación •Mineral con impurezas / Polvo acererías		
	para la fabricación del cemento	Materiales específicos				
Auxiliares		• Yeso y anhidrita sintética. • Escoria de alto horno • Puzolana artificial • Cenizas volantes • Microsilíce y Otros	Si-Al-Ca	Escoria granulada de alto horno Cenizas volantes Pizarra bituminosa Trass y Otros: •Residuo de papel •Cenizas calcinadas / Escorias •Mezclas de óxido férrico y cenizas volantes •Residuos minerales, p.e.: suelos contaminados de aceite		
		Explosivos				
		Ladrillos				
		Aditivos de molienda				
Consumo de agua		Elementos molturantes	S	Yesos y Anhidritas naturales Yesos de instalación desulfuración gas de humo Otros yesos de la industria cerámica o química		
		Superficial / de pozo / bombeada				
		Procedente de red de abastecimiento				
Transporte en medios públicos			F	Residuos con fluoruro cálcico / flúor		
Camión	Tren	Barco	Al	Materiales de las industrias metálicas: •Polvo de las fábricas metal. de aluminio •Residuos tratamientos de las escorias salinas •Polvo de catalizador •Hidróxido de aluminio		
Energía						
Combustibles	Primarios	Fuel Oil Gasóleo / petróleo Gas natural Coque de petróleo Otros combustibles. primarios Carbón Lignito Otros	Combustibles			
		Alternativos	Combustibles alternativos de fuentes renovables	Convencional	Hulla / Lignito / Coque de petróleo Fuel-oil pesado y ligero Gas natural y otros gases Otros materiales combustibles fósiles	
Electricidad expresada como			Energía "final / directa"	Alternativos	Neumáticos / Caucho Aceite usado/ Disolventes Fracciones de residuos industriales Madera usada / Residuos de tapicería Arcilla decolorada/ Otros: •Fracciones tratadas de residuos urbanos •Lodo de petróleo •Residuos de destilación orgánicos •Residuos de alimentos humanos y animales •Residuos material. y papel contaminado con aceite	
		"energía primaria"	Energía			

Tabla 5.3 – Entradas al sistema según CEMBUREAU [1999] y VDZ [2000]

Emisión		EPER	CEMBUREAU	VDZ	
A la atmósfera	CO ₂	*	*	*	
	Polvo / partículas		*	*	
	Dióxido de azufre (SO ₂) y/o SO _x expresado como (SO ₂)	*	*	*	
	Óxidos de nitrógeno (NO _x)	*	* (como NO ₂)	* (no valora NO ₂)	
	Monóxido de carbono (CO)	*	*	* (y carbono orgánico total)	
	Dioxinas y Furanos (PCDD+PCDF)	*	*	*	
	Metano (CH ₄)		*	(no valora)	
	Cloro y comp. Inorgánicos (CIH)	*	*	*	
	Fluor y comp. Inorgánicos (FH)	*	*	*	
	Hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAK)	*		*	
	Benceno	*		* + (tolueno, etilbenceno, xilol)	
	PM10	*			
	NM VOC	*			
	NH ₃		*		
	Bifenilos policlorados (PCB)			*	
	Metales pesados (Oligoelementos)				
	Cadmio y compuestos	Cd	*	*	*
	Mercurio y compuestos	Hg	*	*	*
	Arsénico y compuestos	As	*	*	*
	Cobre y compuestos	Cu	*	*	*
	Cromo y compuestos	Cr	*	*	*
	Níquel y compuestos	Ni	*	*	*
	Plomo y compuestos	Pb	*	*	*
Zinc y compuestos	Zn	*			
Otros: antimonio (Sb), berilio (Be), cobalto (Co), estaño (Sn), manganeso (Mn), selenio (Se), talio (Tl), telurio (Te), titanio (Ti), vanadio (V)			Sb + Co + Mn + V + Sn + Ti	Sb + Co + Mn + V + Sn + Be + Te + Tl	
Al agua	DBO		*		
	DQO		*		
	N total		*		
	Metales pesados		*		
Al suelo	Residuos de proceso para vertedero		*		
	Total	19	28	26	

Tabla 5.4 – Tabla de emisiones según diferentes fuentes

El ciclo se cierra con la etapa de reintegración de la obra, producto a su entorno natural, en las condiciones previstas en la planificación, por lo que debe de estar previsto en esta etapa.

Para todo ese proceso global hay que definir la vida útil del mismo (vida útil de la obra o estructura en estudio) de forma explícita y, no de forma implícita, como es usual en la práctica. El concepto de vida útil muy asumido y considerado en productos industriales de otro tipo (por ejemplo: envases) no está frecuentemente explicitado en el campo de la ingeniería civil y edificación porque el tiempo es mucho mayor. Ello comporta que el valor de la vida útil de la estructura u obra sea, con frecuencia, superior a la vida real de los sujetos que intervienen en la misma y, al no existir una conciencia colectiva sobre dicha estructura u obra, no se explicita valor alguno, por lo que no queda bien definido (cerrado) el ciclo.

En consecuencia, en los estudios de Análisis de Ciclo de Vida de productos en base cemento hay que hacer una definición explícita de la vida útil del producto o estructura en la que se utilizará el cemento. Los valores de la vida útil se hará basándose en la experiencia habitual sobre cada tipo de estructuras. Ello podrá servir de base para otro tipo de trabajo (por ejemplo normativas técnicas), con un elemento beneficioso sobre el sector, por lo que significa de innovación.

5.3.2 - Los límites del sistema

El alcance del ciclo descrito en la figura 2.4, sería completo de los denominados *de la cuna a la tumba*, ya que comienza en la planificación de la obra o estructura y termina, con la reintegración de la misma a las condiciones inicialmente previstas en aras a mantener un desarrollo sostenible.

Ahora bien, no siempre el análisis corresponderá a toda la vida útil de la estructura u obra, sino a parte de ella o algunas de las etapas, como elemento de comparación relativo, entre dos o más productos diferentes. De ahí surge la necesidad de definir los límites de los sistemas que se quieran estudiar. En el caso del ACV se habla con frecuencia *de la expresión de la cuna a la tumba*, que da pie a pensar en todo el ciclo de vida. Sin embargo, en los inventarios utilizados en los estudios de los capítulos anteriores no se contempla el reciclado del hormigón y, sí el del acero, lo que le reporta unas ventajas evidentes cuando se hacen estudios comparativos entre soluciones con diferentes materiales.

El ciclo de vida del proceso constructivo, descrito en la figura 2.4, se puede desarrollar de forma lineal tal como se pretende reflejar en la figura 5.1. En ella se entiende que el proceso constructivo constituye como un *organismo vivo*, con una estructura lineal, formado por numerosas *células*.

En la estructura lineal, están ordenadas secuencialmente, cada una de las etapas del proceso constructivo anteriormente descritas. Cada una de esas etapas se puede dividir en numerosos subetapas que hemos denominado células, las cuales contienen la misma filosofía de trabajo.

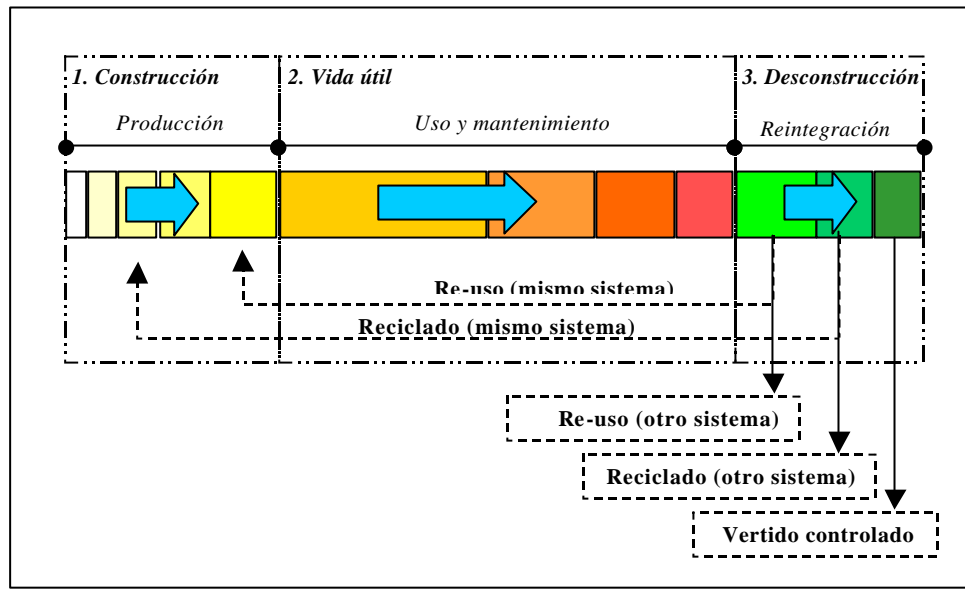


Figura 5.1 – Estructuración lineal del ciclo de vida del un producto de la construcción

Por ello en la figura 5.2 se pretende reflejar lo que sería una célula base del sistema, en la que existen unas entradas, unos procesos, unas salidas (ya sean emisiones, productos o servicios y energía).

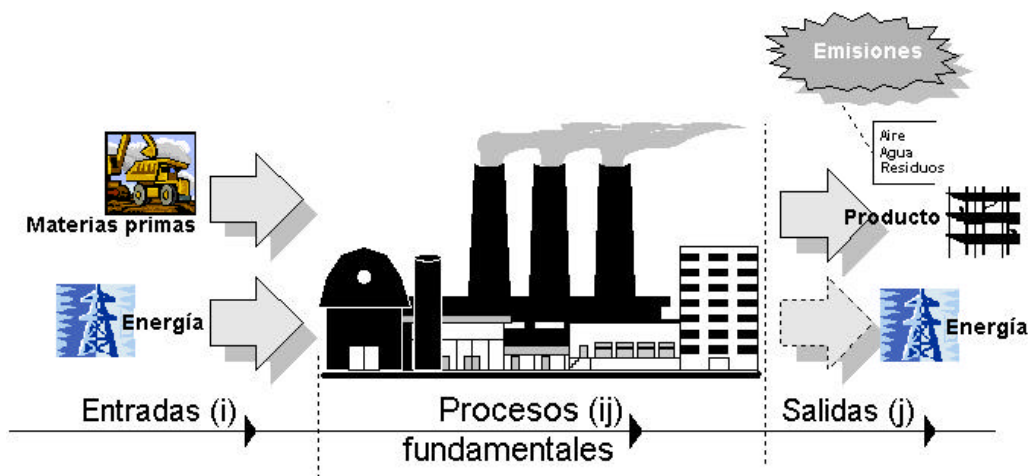


Figura 5.2 - Célula base de un proceso fundamental

5.3.3 - Las entradas del sistema

En las entradas se incorporan las materias primas y la energía, pudiéndose incorporar, tal como se señala con posterioridad, los operarios que intervienen en los procesos considerados. En cuanto a las materias primas, hay que tener presente que las mismas son resultados (por ejemplo, productos) de un proceso anterior, de la cadena lineal que constituye el ciclo de la construcción. La energía es, asimismo, un producto de un proceso previo. Ahora bien, dado que con frecuencia se desconoce la fuente exacta de la energía suministrada, se suele utilizar la media de la matriz energética de cada país. No obstante, en el caso de que se conociese con precisión el origen (por ejemplo, generación propia) se debería tomar los datos correspondientes a la fuente utilizada.

Los elementos de entrada (materias primas, energía y operarios), como productos que son, tienen **Memoria Ambiental (MA)**; esto es, llevan incorporados unos recursos consumidos y unas emisiones previas que, consecuentemente, deberán ser tenidas en cuenta. En este punto es necesaria una reflexión sobre esa memoria ambiental (MA) que, para el caso de las materias primas, puede ser consecuencia de, como mínimo, 3 situaciones diferentes:

- Extracción de nueva planta
- Residuo industrial
- Reciclado

Extracción de nueva planta

En este caso, la memoria ambiental (MA) de las materias primas a consumir en el proceso debe incorporar la totalidad de los recursos utilizados y de las emisiones realizadas. Esto es, en la cuantificación de los mismos deberemos considerar el 100 %, correspondiente al ciclo completo

$$MA_{\text{nueva extracción}} = MA_{\text{ciclo completo}} \quad [5.1]$$

Residuo industrial

Esta situación se puede dar cuando, en la obtención de un proceso industrial principal, se obtienen unos residuos industriales que, constituyen un producto secundario de los procesos y que pueden servir como materia prima o energía para la obtención de otros productos, que en este caso serán los derivados en base cemento. Este es el caso característico de las escorias, cenizas volantes o humo de sílice, para su empleo en cementos y hormigones; o bien el de empleo de combustibles alternativos (neumáticos, harinas animales, fangos secos tratados, etc) en la fabricación del clinker para la fabricación del cemento

Evidentemente, estos residuos industriales o productos secundarios tienen su memoria ambiental ($MA_{\text{residuo industrial}}$), la cual debe considerar no todo lo consumido y emitido en el producto principal hasta el momento de su obtención, sino una parte, que se puede estimar en razón de costes, volumen, peso u otra unidad a definir. Esto es de toda la memoria ambiental del producto industrial principal, el producto secundario (residuo industrial) se queda con una parte, en la que hay que definir previamente, el criterio de asignación. Con ello tendremos que para ese proceso la memoria ambiental total será la suma de la memoria ambiental del producto industrial más la memoria ambiental del residuo industrial (producto secundario)

$$MA_{\text{total producto}} = MA_{\text{producto principal}} + MA_{\text{residuo industrial}} \quad [5.2]$$

Por otro lado, ese producto secundario (residuo industrial) hay que transformarlo en unidades homogéneas de comparación con los procesos en estudio (los correspondientes al sector del cemento). Así, por ejemplo, si se utilizan harinas animales para quemar en los hornos de obtención del clinker, debemos considerar la eficiencia de este combustible frente a los otros más tradicionales de nueva extracción (por ejemplo combustibles fósiles: carbón), esto es se debe determinar los efectos equivalentes de tipo energético. Con el objeto de hacerlo homogéneo en el planteamiento con los materiales de nueva extracción podríamos plantear que:

$$MA_{\text{residuo industrial}} = f_{\text{eficiencia}} * MA_{\text{nueva extracción}} \quad [5.3]$$

Con lo que se evitan problemas de subjetividad de la contribución del residuo industrial (producto secundario) en la ecuación 5.2. El resultado final de la memoria ambiental de todo el ciclo considerando residuos industriales sería

$$\begin{aligned} MA_{\text{total con residuos}} &= MA_{\text{ciclo completo}} - MA_{\text{residuo industrial}} \\ MA_{\text{total con residuos}} &= MA_{\text{ciclo completo}} - f_{\text{eficiencia}} * MA_{\text{nueva extracción}} \end{aligned} \quad [5.4]$$

En esta ecuación (5.4) vemos que si el factor de eficiencia es cero ($f_{\text{eficiencia}} = 0$) la memoria ambiental sería la memoria ambiental total del ciclo, esto es como si no utilizásemos residuos industriales, lo cual es lógico; mientras que si el factor de eficiencia es la unidad ($f_{\text{eficiencia}} = 1$), la memoria ambiental del residuo es la memoria ambiental del material de nueva extracción y, consecuentemente, la memoria ambiental sería la memoria ambiental total del ciclo menos la memoria ambiental del material de nueva extracción, en definitiva, resulta beneficioso medioambientalmente el empleo de residuos industriales, lo cual es bien conocido y la formulación planteada es coherente con ello.

Hay que tener presente que en ese factor de equivalencia sólo se ha considerado las razones técnicas y no se han introducido factor alguno de tipo más político resultante de políticas activas de empleo de residuos industriales, tendentes a favorecer su uso.

Reciclado

En este caso la materia prima se obtiene por reciclado de estructuras o materiales, por ejemplo, áridos procedentes de machaqueo de elementos de hormigón. La memoria ambiental de la materia prima proveniente del reciclado ($MA_{\text{reciclado}}$) en este caso debe incluir todos la memoria ambiental de todos los procesos incluidos en el ciclo (incluso el de demolición), restando la memoria ambiental de los procesos de nueva extracción ($MA_{\text{nueva extracción}}$) equivalentes.

$$MA_{\text{reciclado}} = MA_{\text{ciclo completo}} - MA_{\text{nueva extracción}} \quad [5.5]$$

El signo menos responde a que son materiales que no se consumen al utilizar materiales reciclados y, consecuentemente, representan un beneficio ambiental. Por otro lado, esta expresión, no puede ser negativa, ya sea en recurso o emisiones, y sí, siempre será positiva, ya que la $MA_{\text{ciclo completo}}$ comprende la $MA_{\text{nueva extracción}}$ más la MA del resto de procesos de transformación.

En la citada ecuación 5.5, si hiciésemos la hipótesis que no existe reciclado ($MA_{\text{reciclado}}=0$), nos conduce a que la $MA_{\text{nueva extracción}}$ es igual a la $MA_{\text{ciclo completo}}$ tal y como se expresado en la ecuación 5.1, lo que resulta coherente, siendo asimismo coherente con el caso del empleo de residuos de productos industriales (productos secundarios).

En la ecuación 5.5 como en el caso anterior del empleo de residuos industriales (productos secundarios) no se incluye factor alguno de tipo político resultante de políticas activas de empleo, pero si que se podrían considerar, lo que pasa que ese es un factor subjetivo sobre el ue habría que ponerse de acuerdo previamente.

En una primera aproximación podría considerarse que la $MA_{\text{reciclado}}$ se corresponde con la MA del resto de procesos de transformación. Esta hipótesis es aceptable desde el punto de vista de una simplificación ingenieril, si bien no es correcto desde un análisis de tipo científico, ya que en la ecuación 5.1. no se incluye la evolución de los métodos de extracción con el tiempo. Así al construir el elemento la MA de la extracción para materias primas, será diferente que la que se debería considerar al cabo de la vida real de la estructura, cuando se vaya a reciclar, por la lógica evolución de sensibilidad medioambiental.

Durante los trabajos de verificación de los inventarios existentes, vista en los capítulos anteriores, se produjo en una ocasión, ante la hipótesis de reciclado una energía negativa, lo cual como se ha visto no es posible. Ello responde o bien a que los límites del sistema no estaban bien definidos o a que el inventario de reciclado utilizado era diferente del de partida. En cualquier caso, esto deber servir de llamada de atención para la incorporación de productos de reciclado en los estudios de ACV

5.3.4 - Los procesos del sistema

Con el fin de sistematizar los procesos que se requieren para la obtención de un producto, se clasifican estos en 3 tipos:

- Procesos estratégicos
- Procesos fundamentales
- Procesos de soporte

Procesos estratégicos

Son aquellos que no están en la cadena de producción pero son necesarios para la visualización del producto y su uso, por ejemplo, las campañas de propaganda de un determinado producto, o las campañas de imagen de la empresa o marca.

Procesos fundamentales

Corresponden a los procesos específicos de producción de un producto o un servicio, por ejemplo, la cadena de montaje de un producto industrial (coche, televisor, etc).

Procesos de soporte

Son procesos de apoyo para dar competitividad a un producto o un servicio, por ejemplo, los procesos de gestión económica e informática.

Tal como se ha visto, con relación a los procesos, sólo hacen referencia a los denominados procesos fundamentales en la nomenclatura actual (asociados a los aspectos productivos directos), no incidiéndose en los denominados procesos estratégicos ni en los procesos de soporte. Esta simplificación puede ser razonable en la mayoría de los casos, ya que las emisiones derivadas de estos procesos suelen ser significativamente menores que las que se derivan de los procesos fundamentales, además suelen acarrear una dificultad añadida en la definición de los límites imputables a esos procesos. No obstante, hay que recordar que por un planteamiento

estratégico, la gran mayoría de los países tienen plantas de cemento, estando en segundo término, otros argumentos de tipo técnico.

Que en la actualidad sólo se consideren un determinado tipo de proceso, no quiere decir que conceptualmente sea correcto ni que este sea el camino a seguir. En esta dirección hay que buscar un equilibrio entre, por un lado, los esfuerzos a realizar en la obtención de los recursos utilizados y las emisiones producidas de todos los procesos y, por otro lado, los beneficios que se obtengan.

Un primer paso a considerar, razonable tanto desde el punto de vista científico como desde el punto de vista ingenieril, es incluir sólo los procesos o parte de ellos (estratégicos y de soporte) que intervienen directamente para la materialización del producto o servicio, por ejemplo, los transportes de los operarios que se desplazan a la fábrica. Aquí no se incluiría los desplazamientos que se pudiesen realizar para ir a la sede central de la compañía.

5.3.5 - Las salidas del sistema

De los procesos se derivan unas emisiones (E), que pueden ser de distinto tipo, tal como se ha visto en los capítulos anteriores y que inciden en el aire, el agua o como sólidos (p.ej.: polvo). Las emisiones totales del ciclo (o de parte de él, comprendidas en los límites del sistema que se fije) será la suma de emisiones parciales (E_i) producidas en cada uno de los subsistemas en los que se desglose el sistema total estudiado. Evidentemente, para facilitar la suma en igual medio se deben adoptar (pasar a) unidades equivalentes (p.ej.: toneladas de CO_2)

$$E_{\text{totales}} = \sum_{i=1}^n (E_i) \quad [5.6]$$

siendo n el número de subsistemas o subprocesos en los que se divida el sistema en estudio.

La salida principal de un proceso será un producto (no se habla ahora de servicios) que servirá como materia prima para el siguiente o siguientes procesos que existan en el sistema. No obstante pueden existir otras salidas ya sean reflejadas como productos secundarios (los cuales pueden ser emisiones sólidas tratadas con posterioridad (por ejemplo, humo de sílice) o bien, como energía (por ejemplo, calor para calentar agua). Las emisiones constituyen salidas del sistema, pero no como objeto de los procesos sino como consecuencia constituyente de los mismos.

Las salidas pueden estar en la salida de fábrica o bien, en punto intermedio de la misma, por lo que requerirá de otros procesos como es el transporte para situarlo en el punto que se precisa como entrada de materia prima para el siguiente proceso. Estos transportes pueden ser,

evidentemente, internos (en fábrica) y externos y constituyen un proceso en sí mismos, aunque en este caso, un servicio (no un producto). El transporte forma parte del grupo de procesos de soporte y, desde el punto de vista medioambiental es el que mayor emisiones suele producir, por lo que es objeto de estudio específico, no teniéndose en cuenta otros procesos de soporte que puedan existir en el sistema en estudio.

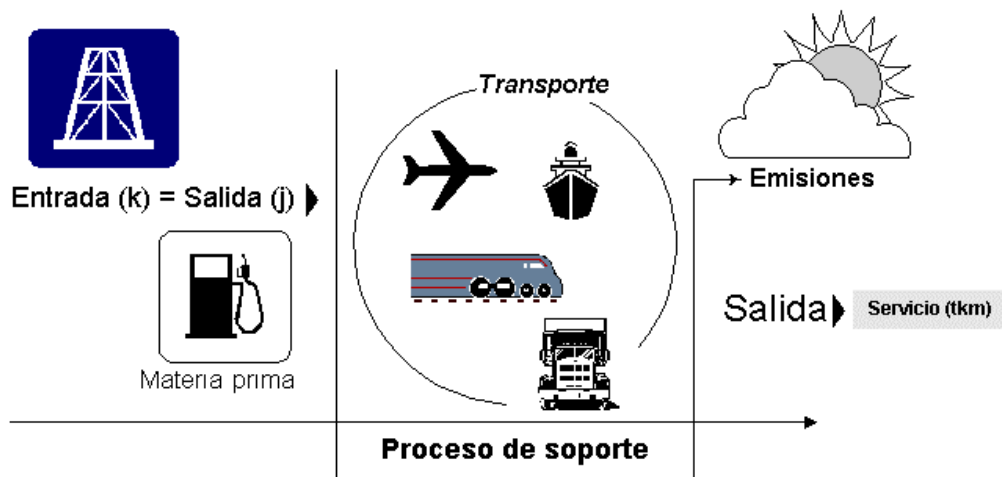


Figura 5.3 - Visualización de un transporte (servicio) como un proceso.

En el conjunto del ciclo no se introducen los operarios que se precisan para hacer posible el ciclo, lo cual es conceptualmente poco correcto, ya que dichos operarios, por ejemplo, en sus desplazamientos a los puestos de trabajo, consumen recursos y realizan emisiones. Sin embargo hay una aceptación general de no considerarlas fruto de las dificultades de la evaluación medioambiental de las actividades realizadas por las mismas, y de las posibilidades de realizar una evaluación subjetiva al poder introducir criterios de tipo político, en especial, en el estudio de los efectos locales. Por el contrario, su no consideración impide estudios integrados con otros puntos de vista del análisis, económicos, seguridad, calidad, valor, etc.,

Aunque tal como se ha dicho no se consideran las personas, entendemos es interesante visualizar como se incorporarían las mismas en el caso que se estimase oportuno. Para ello hay que ver a las personas, operarios de los procesos, como productos (salidas) de un proceso, en el que la materia prima (entrada) la constituye la relación de sus padres, los procesos estratégicos lo constituyen las políticas estatales y familiares, los procesos fundamentales lo constituye la educación (formación cultural y profesional) y los procesos de soporte, para este caso, los transportes a planta. En la práctica, la consideración de las personas sólo alcanzaría a la parte de procesos de soporte o, más en concreto, al transporte a fábrica. Fijémonos que este planteamiento

permite su integración en modelos de gestión de la construcción más amplios en los que se incluya temas de seguridad, calidad, etc.,

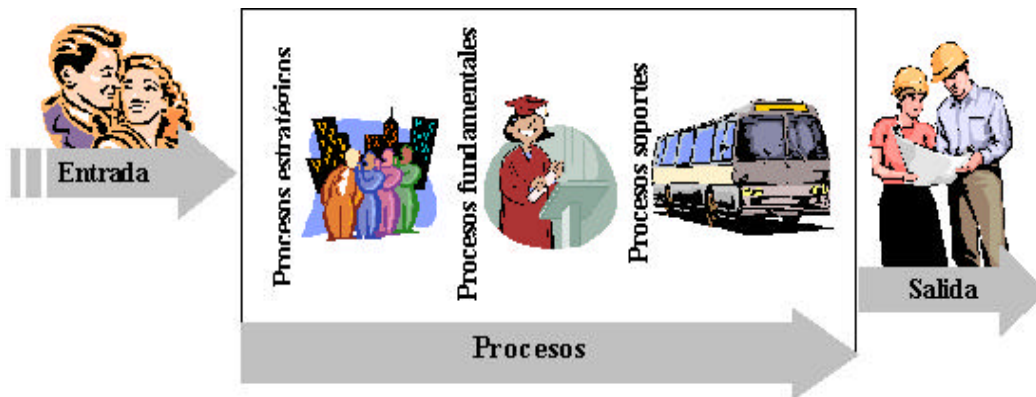


Figura 5.4 - Visualización de un operario como producto resultante de un proceso.

Sobre lo expuesto en el párrafo anterior, conviene reflexionar en el sentido de que los operarios a introducir deberían ser los operarios que intervienen en los procesos fundamentales y de soporte directamente implicados en el proceso, lo cual son datos objetivos. No deben considerarse los operarios que intervienen en otros procesos (tales como comercialización) dada la mayor dificultad de medir y la probable subjetividad que podría producirse, incidiendo de forma negativa en la credibilidad del planteamiento. Los errores que pueda introducir esta hipótesis se estiman como muy pequeños, por lo que se entiende que ingenierilmente, puedan no considerarse.

El planteamiento global que se realiza permite desglosar de forma correcta la aportación de cada subsistema, ya que el sistema que se considere será una suma de subsistemas, lo cual facilita el aparato matemático posterior de evaluación. Asimismo, ello permite conocer la contribución de factores del mismo tipo, por ejemplo, consumos en transportes, lo cual resulta interesante a la hora de definir políticas de actuación. Por último este planteamiento global permite integrar sistemas de evaluación hoy en día separados que inciden en aspectos específicos del tema, emisiones desde el punto de vista ambiental, seguridad, calidad, etc.,

En lo que sigue se hacen diversas simplificaciones a este planteamiento global ya que sólo se incidirá en aspectos medioambientales, haciendo una evaluación a través de la técnica del Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Por otro lado, y tal como se ha dicho no se incorporan los operarios, ni los procesos estratégicos de los diferentes subsistemas. Por otro lado y para evitar los errores que se detectaron en los inventarios utilizados se hace una detallada descripción de

los límites del sistema y subsistemas considerados en cada caso. Evidentemente, en una estructura de sumatorios como la que se presenta, los subsistemas pueden articularse como se estimen oportuno, si bien deben sumar entre todos el 100 %, esto es que no queden lagunas ni que existan superposiciones.

5.4 – PROPUESTA DE ESTRUCTURACIÓN DEL MODELO

5.4.1 - Los límites del sistema

En primer lugar hay que definir la unidad de producto que se trata de alcanzar y, consecuentemente, los límites del sistema en los que se encaja el mismo. La unidad de producto es un kilogramo (o bien tonelada) de cemento en la salida de fábrica. Ello se hace para ser homogéneo con el tratamiento dado en otros inventarios, tal como se ha visto en el capítulo anterior y, por otro lado, para no introducir el transporte ajeno a la fábrica en la salida y, de esta forma hacer más comparable los productos de cada una de las fábricas.

Con relación a los límites del sistema se considera que el mismo se inicia en la extracción de las materias primas principales, e incluye las etapas intermedias (subsistemas) hasta la expedición de la unidad de producto en la salida de fábrica. Este planteamiento se centra en una parte del ciclo de vida expuesto en la figura 5.1, no incorporando otras etapas como, por ejemplo, la de uso y la de reintegración (reciclado en la nomenclatura más usual). En definitiva, en los límites no se incluye su incorporación como materia prima del hormigón y el reciclado de los elementos estructurales fabricados con el mismo (por ejemplo, como áridos para una nueva aplicación como hormigón). Ello obedece a ser homogéneos con el tratamiento dado en otros inventarios, no obstante en los apartados anteriores se han sentados las bases teóricas para la inclusión, tanto del hormigón reciclado, como el empleo de residuos industriales (productos secundarios) en el proceso. En los temas de ACV debe considerarse, ya que sino al hacerse análisis comparativos con otros materiales de construcción, por ejemplo, el acero, la consideración del reciclado en este, puede favorecer el mismo, en detrimento de los materiales en base cemento. En consecuencia, hay que insistir en la necesidad de avanzar en la definición de los inventarios con la descripción correcta de los temas de reciclado y el empleo de residuos.

5.4.2 - Estructuración en subsistemas

Tal como se ha planteado en el apartado anterior un sistema es la suma de subsistemas en los que se puede desglosar el mismo, de forma tal, que dicha suma de subsistemas (independientemente de cómo se estructure) represente el 100 % del sistema. Cada uno de estos subsistemas debe incorporar el transporte asociado para hacer factible su uso en la siguiente etapa. En consecuencia, el sistema principal de obtención de una unidad de cemento (kg o tonelada) se puede dividir de diferentes formas, aunque es frecuente dividirlo en los siguientes cuatro subsistemas que se muestran en la figura 5.5.

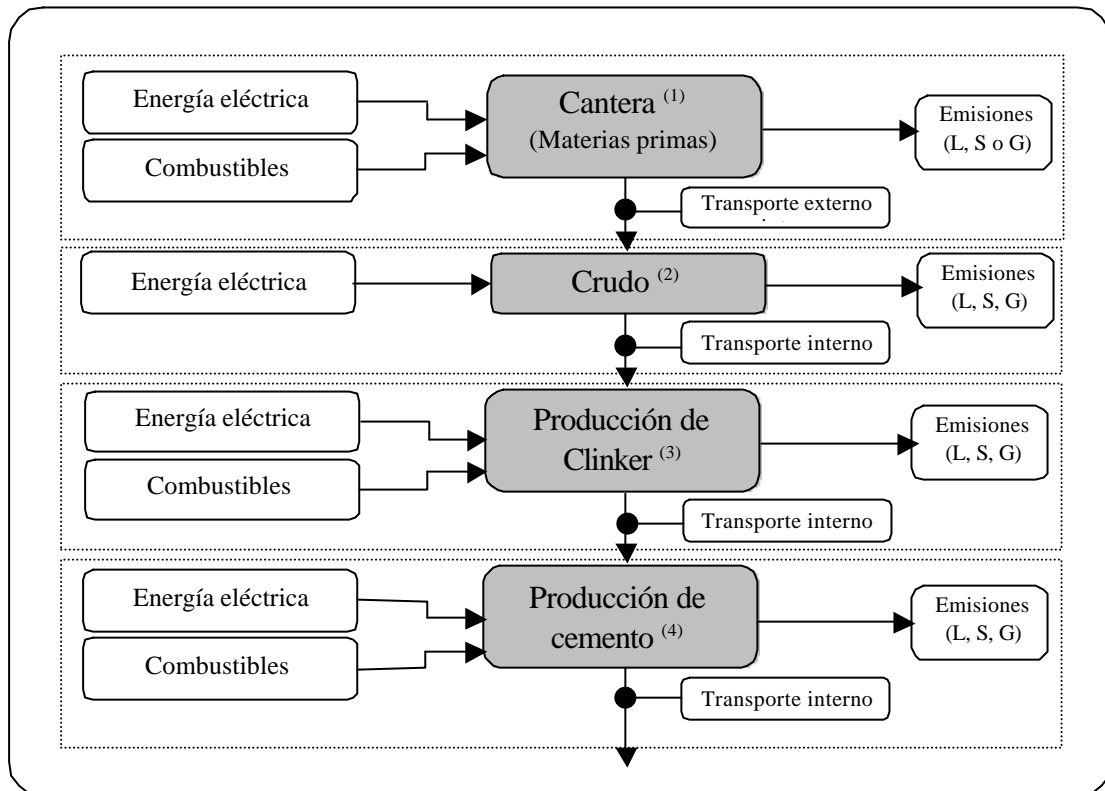


Figura 5.5 - Estructuración en subsistemas

- Subsistema **Cantera** correspondiente a la extracción de las materias primas (caliza o marga, etc), con origen y final en la misma. Las entradas de material de este subsistema están definidas por los explosivos, los combustibles para las herramientas mecánicas (perforadoras, palas mecánicas, compresores, entre otros), los lubricantes y otros, en cantidades menores, las cuales pueden provenir de otras fuentes distintas. En general, si la Memoria Ambiental (MA) de estas otras materias primas (en menores cantidades) es de escasa repercusión se suele adoptar el criterio de no valorar su contribución. La salida viene representada por el material resultante de las voladuras del macizo rocoso. La emisión característica de este subsistema es el polvo originado en la retirada de estéril, voladura, carga y desplazamientos de los vehículos transporte por caminos internos del área. Otras emisiones al aire (CO₂, NO_x, SO₂) resultan de la quema de combustibles fósiles consumidos en los equipamientos y vehículos utilizados en el sistema conforme se describe en los inventarios analizados en el capítulo 3. El proceso de transporte en este caso corresponde al desplazamiento de la materia prima al punto de tratamiento posterior (interno o externo).

- Subsistema **Preparación del crudo** correspondiente a la molienda y manipulación de las materias primas para su incorporación posterior en el horno del clinker. Las entradas de materiales de este subsistema son las rocas de la cantera y las adiciones (minerales de arcilla, óxidos férricos, pizarras), que se precisan como elementos de corrección del crudo, mientras que las entradas energéticas corresponden a los combustibles o electricidad utilizadas por los molinos y equipamientos auxiliares (cintas transportadoras, etc.). La energía requerida en el proceso procede casi exclusivamente de la electricidad necesaria para los aparatos electromecánicos utilizados. La salida viene representada por el material de crudo resultante de la manipulación de las rocas. Como emisiones de este subsistema están, por un lado, el polvo originado en la molienda y, por otro, las emisiones al aire resultantes de la quema de combustibles fósiles consumidos en los equipamientos y vehículos utilizados en el sistema. El proceso de transporte en este caso es, principalmente, de tipo interno (molinos, relativamente próximos a horno de clinker). Este subsistema es claro desde el punto de vista conceptual, si bien su repercusión es pequeña, por lo que se podría integrar en uno más amplio denominado producción de clinker.
- Subsistema **Producción del clinker** correspondiente a las operaciones en el horno de clinker. Las entradas de materiales de este subsistema son, principalmente, las correspondientes al crudo resultante del subsistema anterior y al combustible requerido en el calentamiento del horno (lo cual representa en el entorno del 96% de la energía requerida, siendo el otro 4 %, energía eléctrica utilizada en el funcionamiento de equipamientos eléctricos, tales como: motores, filtros, extractores, etc.). Estos combustibles pueden ser recursos no renovables (carbón, gas natural o derivados del petróleo) o bien, residuos de otros procesos (neumáticos, etc.). Este subsistema es de gran repercusión desde el punto de vista de las emisiones. La salida del sistema es el clinker depositado en los silos de almacenamiento. Las emisiones de este subsistema son las más significativas de todo el sistema, centrandó su origen en las reacciones químicas de formación del clinker y en la quema de los combustibles utilizados. Las emisiones principales son gases (dióxido de carbono (CO₂), dióxido de azufre (SO₂) y óxido nitroso (NO_x)), además de partículas sólidas pulverulentas. A ellas hay que añadir también las emisiones propias del sistema de producción de la electricidad consumida por el subsistema para poner en marchas todos los aparatos electromecánicos que lo constituyen. El transporte de esta etapa es interno, usualmente, mediante cintas transportadoras, ahora bien, si la planta de cemento no fabrica el clinker, sino que sólo lo manipula, debe incluirse el transporte externo que se requiera hasta la fábrica de cemento.

- Subsistema ***Producción del cemento*** correspondiente las etapas dosificación, mezclado y molienda y, está compuesto principalmente, por unidades electromecánicas de básculas, unidades de bombeo, cintas transportadoras. La entrada de material es clinker, yeso y otras adiciones y aditivos que se puedan considerar, en función del tipo de cemento que se esté produciendo; mientras que la salida del sistema es cemento envasado para distribución (ya sea en sacos, camión, barco, etc.). El transporte de esta etapa se considera interno, no incluyendo el transporte externo de la fábrica de cemento a las plantas de hormigón o de otro tipo donde se requiera su consumo. El consumo energético corresponde, principalmente, a energía eléctrica, aunque también puede requerirse de combustibles fósiles para el uso en ciertos motores de transporte interno (hasta el punto de expedición, considerado en salida fábrica). Este consumo energético es pequeño situándose en el entorno del 5 % de todo lo requerido en el sistema global visto. Las emisiones del subsistema son, principalmente, polvo y las correspondientes a la quema de combustibles de los medios internos de transporte y las emisiones típicas de la matriz energética que suministra electricidad al sistema.

Hay que tener presente que si queremos mantener el criterio de alcanzar el 100 % del sistema, la estructura de los subsistemas es lineal (en serie) de forma tal, que la salida de cada subsistema es la entrada del siguiente subsistema. Una estructuración similar a la expuesta puede verse en la figura 5.6 [Viñals et al., 2000]. En todas ellas hay que definir claramente cuales son las entradas y las salidas de cada subsistema, habiéndose considerado en las salidas las emisiones correspondientes a cada subsistema.

Asimismo, hay que tener presente que cada subsistema puede, aún, desglosarse en otros subsistemas que lo constituyen. Así, a manera de ejemplo, en la figura 5.7 se desglosan los subsistemas dados por Viñals [2000] para un caso concreto, en otros subsistemas, más de detalle.

En cualquier caso, e independientemente del desglose que se realice, debe quedar muy claro y diferenciado los datos (entradas y salidas) correspondientes a cada subsistema. En este punto debe hacerse una llamada de atención especial en las fábricas que producen clinker y cemento, para que den los datos de forma separada para imputar a cada uno de los subsistemas.

Este mayor detalle puede tener interés en etapas de implantación de estos estudios en una fábrica, para evaluar cada uno la incidencia de los diferentes subsistemas que se consideren. En esta línea en el capítulo 6 se presenta una aplicación específica para una fábrica del entorno catalán, pudiéndose observar en el mismo como se actúa en cada una de las fases en las que se desglosan los subsistemas.

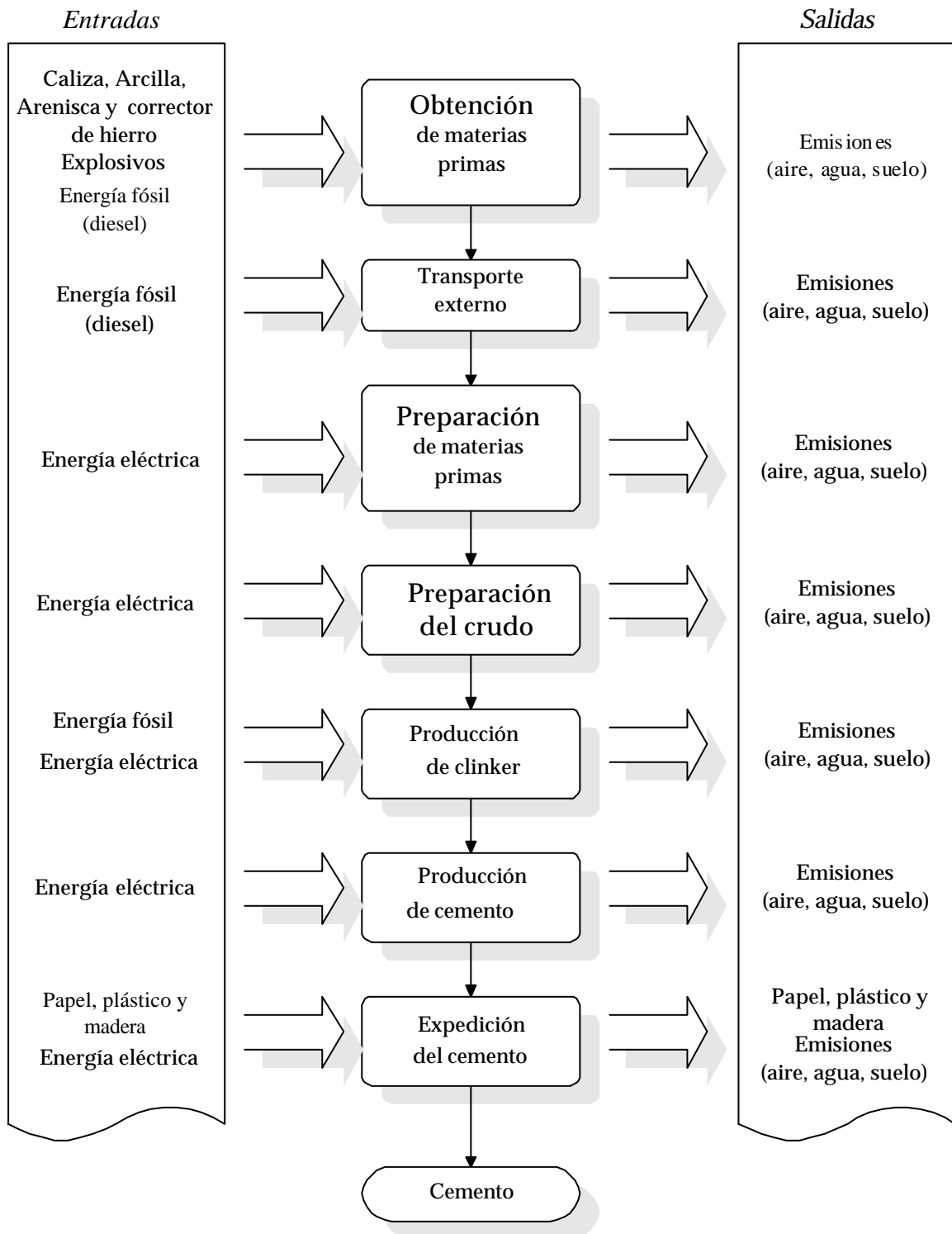


Figura 5.6 - Estructuración en subsistemas [Viñals et al.,2000]

5.4.3 - Número de subsistemas a utilizar en los estudios nacionales

Ahora bien, para un estudio más global, en el ámbito nacional, hay que tender a simplificar, no entrando tanto en el desglose y, al mismo tiempo limitando el número de los subsistemas. La propuesta del número la haremos en función de la utilización que se quiera dar, ya sea interna al sector o bien externa al mismo.

Esta diferenciación responde a que en el uso interno interesa conocer mejor las diferencias entre plantas, lo cual conduce a un mayor detalle, mientras que para el uso externo, conviene presentarlo como productos que serán materias primas para la obtención de otros productos derivados del mismo (por ejemplo, hormigón).

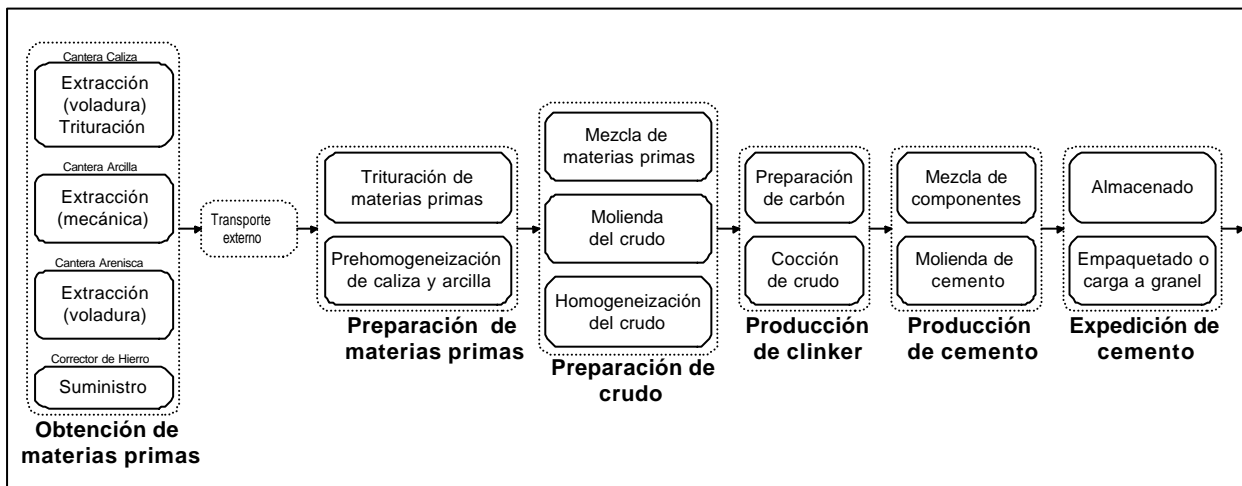


Figura 5.7- Desglose de los subsistemas dados por Viñals [2000]

En el caso de utilización interna dentro del sector la propuesta es desglosar el sistema denominado cemento en los cuatro subsistemas representados con anterioridad en la figura 5.5. Esto permite la suficiente flexibilidad para conocer las diferencias de características de producción de cada planta. El detalle en cada uno de estos subsistemas puede ser el que la fábrica considere oportuno, si bien las salidas de cada subsistema deben ser comunes para hacer comparativos los estudios entre plantas.

En el caso de utilización externa al sector la propuesta es desglosar el sistema cemento en dos subsistemas correspondientes al clinker como producto (unión de los tres primeros subsistemas de la estructuración anterior) y a la manipulación y facturación del cemento (el 4º de los subsistemas estudiados). Esta división tiene una ventaja añadida y es que es la utilizada en los inventarios vistos en el capítulo 3 y 4, por lo que permite hacer comparaciones directas con los resultados correspondientes a esos inventarios.

Otro aspecto a tener en cuenta en esta división, es que el subsistema que acaba en el clinker como producto tiene una gran repercusión, tanto en las entradas como en las salidas. Así por ejemplo, utiliza del entorno del 95% de la energía del sistema cemento, tal como se ha visto en los capítulos y apartados anteriores. Esta importancia debe ser reconocida en la estructuración realizada. Asimismo, en el caso de las emisiones de ámbito local o regional, hay que tener presente que el clinker puede ser importado de otro país o de otra zona geográfica del mismo país, por lo que el desglose en este subsistema permite repercutir de forma diferenciada.

5.4.4 - Valores representativos a utilizar en los estudios nacionales

Los valores representativos a utilizar dependerán de las características de los estudios, clasificando estos de internos o externos. Como internos se consideran aquellos estudios que puede realizar una fábrica de cemento para sus cementos, como medida de política medioambiental de empresa. Como externos se consideran los que se utilizan como representativos de los tipos de cemento en el ámbito nacional.

Para los estudios internos de cada planta se utilizarán los valores reales que se produzcan en las mismas y, ello, tanto para las entradas como para las salidas. Así, en una planta determinada puede conocerse (con gran precisión) el origen de la electricidad utilizada en la misma, y deberían ser estos los valores utilizados, ya que utilizar valores medios correspondientes a la matriz energética puede ser desfavorable y con pocos incentivos para la mejora de los procesos, internos de la planta.

Con respecto a las emisiones, detalladas al nivel que se considere oportuno por el sector, deberían cumplir como mínimo las dos condiciones siguientes:

- Incluirse todas las emisiones que tengan limitaciones de tipo normativo impuesto en los reglamentos de carácter nacional o local.
- Convendría incluir las emisiones dadas en los inventarios internacionales existentes, como elemento de referencia y contraste para una estrategia de empresa a la hora de la exportación del producto.

Las disfunciones (incumplimientos normativos) que se pudiesen obtener en los estudios de cada planta y tipo de cemento debería servir como política de empresa para corregir dichas disfunciones.

Para los estudios externos de comparación con otros materiales o con cementos tipo de otros países se debería tomar, para cada categoría de cemento, unos valores medios tanto de las entradas como de las emisiones, o bien unos valores dentro de una horquilla (valores medios a

los que se incorporen unas tolerancias). En los datos de entrada, por ejemplo electricidad, se puede tomar la matriz energética del país, que para la situación de España en la actualidad se presenta en la tabla 5.3. En la misma se muestran las previsiones del Consejo Mundial de la Energía [Herrero, 2000] para el año 2020 con una población mundial en el entorno de 8.300 millones de personas, en la que se requerirán 13,7 Gtoe¹.

Como puede verse, la localización es un factor importante desde este punto de vista, lo cual refuerza aún más la necesidad de definir a priori las fuentes a utilizar en la realización de estudios comparativos para que estos sean homogéneos, ya que sino, no estamos utilizando cosas que sean comparables entre sí. Por otro lado, hay que pensar en que dicha matriz energética varía con el tiempo, lo cual debería tenerse en cuenta, tanto en valores absolutos como en estudios relativos de comparación. Cabe recordar que la matriz energética sirve para evaluar tanto recursos consumidos como emisiones derivadas de su obtención.

Fuente energética	España (1996)	Mundial (1996)	Mundial (2020)
Carbón	0,0547 (31,4%)	5,10 (39%)	3,8 (27,73 %)
Petróleo	0,014 (8,03%)	1,0 (8%)	3,0 (21,90 %)
Gas	0,007 (4,01%)	1,9 (15%)	3,0 (21,90 %)
Nuclear	0,056 (32,13%)	2,4 (18%)	0,8 (5,84 %)
Hidráulica	0,041 (23,52%)	2,5 (19%)	0,9 (6,57 %)
Energías renovables	0,0016 (0,91%)	0,13 (1%)	2,2 (16,06 %)

Tabla 5.3 - Matriz energética en España y en el ámbito mundial (años 1996 y 2020)

Con relación a los valores medios de las emisiones se puede llegar a ellos, tras la obtención de los valores de cada uno de los inventarios de los cementos de las distintas plantas, o bien, ya que ese proceso puede ser largo (la disposición total de todos los inventarios), a través de unos valores aceptados por el sector (limitado en número) a partir de unos datos reales medidos en fábrica y contrastados con datos de inventarios internacionales y vías alternativas de evaluación vistas en los capítulos anteriores.

5.4.5 - Punto de vista del análisis

Con respecto al principio propuesto de rigor es fundamental superar algunos de los problemas detectados en los inventarios existentes, con relación a los recursos utilizados (entradas) y a las emisiones (salidas) producidas por la generación térmica de energía eléctrica y otras variables. En principio deben tenerse siempre en cuenta, que los factores aditivos a considerar sean homogéneos y que este análisis sea posible desde diferentes puntos de vista:

¹ Gtoe – Giga toneladas (10⁹) de óleo equivalente.

análisis, local, regional o autonómico.

En la figura 5.8 se muestra un esquema del proceso global del análisis de un producto a lo largo de su ciclo de vida (aunque resulta válido para cualquier etapa del mismo). En la misma puede observarse que las entradas se plantean de 4 tipos (materias primas, energía, transporte y operarios) y que las emisiones de cada una de ellas en su memoria ambiental (MA) se desglosa en tres niveles (local, regional y global). Ahora bien, mientras que los efectos globales afectan a todo el planeta, independientemente del punto de vista, los efectos locales (EL) y los efectos regionales (ER) pueden ser diferentes el entorno que se producen al entorno en el que se analizan, por lo que les denominaremos $EL_{i,p}$ y $ER_{i,p}$, respectivamente, donde $EL_{i,p}$ expresa los efectos locales generados en los diferentes orígenes (i), para obtener un producto transformado (p) y $ER_{i,p}$ expresa los efectos regionales generados en los diferentes orígenes (i), para obtener un producto transformado (p).

Efectos										Punto de vista del análisis				
GLOBAL (G)										Global: $\sum_{i=1}^n G_p$				
REGIONAL	R _i									Regional: $\sum_{i=1}^n R_p$				
	R _p													
LOCAL	L _i									Local: $\sum_{i=1}^n L_p$				
	L _p													
		Materias Primas (j)	Energía (k)	Transporte (Tj)	Operario	ENTRADAS		Proceso 1	Proceso 2	...	Proceso n	SALIDAS		Producto principal
						Fundamentales	Transportes	Fundamentales	Transportes	...	Fundamentales	Transportes	Productos secundarios	
													Energía	

Figura 5.8 - Visualización de los efectos a diferentes niveles en función de donde se originan

Si el análisis se realiza desde el punto de vista de una planta de cemento, los efectos que habría que tener en cuenta son, además de los globales, los efectos locales y regionales que se producen en el entorno de la planta, esto es, cuando el origen (i) coincide con la ubicación de la planta del producto (p). Este planteamiento permite hacer un análisis desde el punto de vista del productor y de la Administración, ya sea ésta local, autonómica, estatal o supranacional.

Los efectos totales generados serán la suma de los efectos generados en cada una de las etapas de los procesos, en los que se desglose el ciclo de vida del producto (n). Esta suma sólo debe afectar a los términos homogéneos, esto es, efectos locales del mismo origen, efectos regionales del mismo origen y efectos globales independientemente del origen.

En las entradas se tiene en cuenta las vistas en apartados anteriores de acuerdo con el planteamiento realizado en los mismos. Respecto al transporte (T_j) como entrada se quiere reflejar las emisiones realizadas en el transporte de las materias primas desde donde se producen hasta donde se requieren para su consumo.

Como salidas se han considerado el producto principal, motor de la actividad, los productos secundarios o subproductos que puedan utilizarse posteriormente como materia prima de otros productos (por ejemplo, cenizas) y se ha dejado la posibilidad de que una salida sea energía (por ejemplo, agua caliente, reutilizada en otros procesos aunque, evidentemente, no siempre tiene porque producirse). Evidentemente, los operarios podrían considerarse como salida, ya que no son engullidos por el proceso, pero lo que aquí representan son los viajes de entrada y salida de planta de producción y, ya están considerados en la entrada.

En la citada figura las emisiones que constituyen la Memoria Ambiental, desglosadas por sus efectos a diferentes niveles (local, regional y global), se ha desarrollado a manera de ejemplo los efectos que se producen con las materias primas empleadas y con los operarios y en uno de los procesos. Así con las materias primas se quiere señalar que pueden ser diversas y de distinto origen (i variable). En el caso de que el origen sea lejano de la planta de producción los efectos locales y regionales de estas materias primas, no deben imputarse al producto en estudio dentro del ámbito territorial que le corresponde y, sí debe ser tenido en cuenta sus efectos, en el ámbito territorial que se originen. Los efectos globales, tal como se ha dicho son independientes del origen geográfico y, consecuentemente debe tomarse en todas y cada uno de los procesos.

El planteamiento realizado permite un seguimiento fácil de la memoria ambiental del ciclo completo ($MA_{\text{ciclo completo}}$) como suma de la memoria ambiental producida hasta la entrada en la planta de producción en estudio (MA_{entradas}) y la que se genera en la propia planta durante la producción ($MA_{\text{proceso producción}}$):

$$MA_{\text{ciclo completo}} = MA_{\text{entradas}} + MA_{\text{proceso producción}} \quad [5.7]$$

Por otro lado, la memoria ambiental del ciclo completo ($MA_{\text{ciclo completo}}$) puede desglosarse en la salida en función del producto principal ($MA_{\text{producto principal}}$) y de los productos secundarios ($MA_{\text{productos secundarios}}$), de acuerdo con lo expresado en la ecuación 5.2 del apartado 5.3.3.:

$$MA_{\text{ciclo completo}} = MA_{\text{producto principal}} + MA_{\text{productos secundarios}} \quad [5.8]$$

Este desglose se hará en porcentajes del total, lo que facilita su empleo. Ahora bien, el desglose deberá hacerse de acuerdo con algún criterio previamente acordado y no como consecuencia de una utilización tendenciosa de los mismos. Los criterios pueden ser muy diversos, desde criterios económicos, por ejemplo, los beneficios generados con el producto principal y los productos secundarios, hasta medioambientales, como los vistos en la ecuación 5.1.

5.4.6 - Otras consideraciones

Un aspecto a tener presente es la reciclabilidad o no del cemento. El mismo, no deja de ser un producto intermedio (materia prima para un proceso posterior, por ejemplo, fabricación de hormigón) y no un producto finalista (por ejemplo, perfil de acero). Por ello, la reciclabilidad del cemento (materia prima para inicio del proceso) no debería tenerse en cuenta aquí y sí, en todo caso, al considerar la reciclabilidad del hormigón, como áridos como materia prima de un nuevo hormigón.

Ahora bien, en el combustible requerido en el horno del clinker se pueden quemar productos que sean residuos de otros procesos. El beneficio medioambiental de minimización de recursos debe tenerse en cuenta, en este caso, traduciéndose en unidades equivalentes de un recurso fósil no utilizado (por ejemplo, carbón), si bien, las emisiones serán las correspondientes al recurso utilizado (no al equivalente). El planteamiento a seguir en este caso es el expresado en el apartado 5.3.5.

Otro aspecto sobre el que reflexionar sería la vida útil del ciclo de vida. El cemento, tal como se ha dicho es un producto intermedio y su aportación, en tiempo, respecto a los productos derivados del cemento (hormigón), es pequeña. Así podemos hablar del entorno de pocos meses, frente a años en las estructuras realizadas con hormigón. Esta situación hace que la consideración a estos efectos sea que los estudios deben ser independientes del tiempo, cuando se está hablando sólo de cemento y que se considere la vida útil de la estructura o del elemento estructural analizado, cuando se trate de estudios de ACV de estructuras o elementos estructurales, con materiales en base cemento.

Otro aspecto sobre el que hay que reflexionar es el grado de regeneración del daño producido por las emisiones. De forma intuitiva, parece obvio desde el punto de vista medioambiental utilizar recursos renovables frente a recursos no renovables, los cuales no permiten una regeneración del recurso. Asimismo, si los efectos son dañinos (por ejemplo, efecto invernadero) habría que primar el empleo de recursos, energías y procesos que minimizaran dichos efectos. Eso se podría hacer a través de un factor que prime el reciclado de forma política y, para ser homogéneo con el tratamiento dado hasta el momento, ello se podría plantear a través

de una modificación de la ecuación 5.5 con un factor (γ) que aumente la memoria ambiental de no tener que utilizar un recurso de nueva extracción ($MA_{\text{nueva extracción}}$).

$$MA_{\text{reciclado}} = MA_{\text{ciclo completo}} - \gamma * MA_{\text{nueva extracción}} \quad [5.9]$$

En consecuencia, el uso de un material reciclado, vendría favorecido a través de una reducción de la memoria ambiental del mismo y, desde ese punto de vista puede hacerle competitivo.

5.5 - CONCLUSIONES

Del presente capítulo se pueden obtener las siguientes conclusiones parciales, las cuales hay que verlas enmarcadas en el contexto del presente trabajo:

- En primer lugar se hace un análisis de la necesidad de realizar un inventario nacional de la producción del cemento, ante la evidencia de la inexistencia del mismo, la tendencia creciente en esa dirección y las dificultades encontradas en los inventarios internacionales existentes y accesibles (CEMBUREAU y SimaPro)
- Con posterioridad se sientan los criterios y las bases sólidas para el desarrollo posterior de un inventario tipo en el ámbito nacional que sea integrable con inventarios de otros productos y con inventarios de cemento, pero de otros ámbitos (inventarios internacionales citados). En el afán de ese planteamiento integrable en la metodología usual de ACV, no se cambian ni los efectos considerados ni los programas existentes y, sí se cambia, diversos aspectos conceptuales y metodológicos que ayudan, tanto a la comprensión de los fenómenos, como a la valoración de cada parte.
- La propuesta incorpora aspectos conceptuales relativos al ciclo de vida de la construcción y se hace un paralelismo con el cemento, integrando este en aquel. Este planteamiento permite una definición precisa de los límites que deben incorporarse en casa sistema o subsistema en los que se divida.
- Esas bases están fundamentadas en una metodología científica que permite obtener la memoria ambiental (MA) de un producto, desglosada en los diferentes subsistemas en los que se puede desglosar el sistema global de obtención del mismo, facilitando la incorporación metodológica de los planteamientos de reciclabilidad.
- Asimismo se ha definido una forma de abordar los temas de imputación de efectos desglosado en locales, regionales y globales, permitiendo un análisis separado, en

función de la entidad que realice el mismo (planta de producción, administración local, autonómica, nacional y supranacional).

- También se incorporan conceptos hasta ahora no considerados, con relación a los operarios que intervienen de forma directa en los procesos de producción de un producto (procesos fundamentales). Ello se hace a través de una visualización de que los operarios en fábrica son el resultado de un proceso, donde los procesos de soporte, son los desplazamientos a la fábrica.

CAPÍTULO 6

APLICACIÓN DEL ACV EN LA ELABORACIÓN DEL INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA DE LA FABRICACIÓN DEL CEMENTO

6.1 - ANTECEDENTES

Los capítulos anteriores indican que los inventarios del ciclo de vida del sistema de producción constituyen una pieza fundamental para se lograr éxito a la hora de evaluar los impactos medioambientales aplicando la metodología del análisis del ciclo de vida. Cuando se aplica esa metodología a los productos con base cemento, las bases de datos disponibles no contienen la representatividad necesaria para evaluar, por ejemplos, los impactos medioambientales asociados a un producto de hormigón producido en España o hasta mismo permitir a los productores de cemento intercedieren sobre sus proceso de producción.

Así para construir ese inventarios con representatividad nacional, en el capítulo 5, se propone una metodología estructurada en que a continuación se aplica a un caso real para observar como el mismo podrá actuar en cada una de las fases del sistema de producción de cemento.

6.2 - OBJETIVOS

Los objetivos que se persiguen en este capítulo son los siguientes:

- Construir un Inventario de la fabricación de cemento portland a partir del estudio de un caso real. Es decir, tomando los datos reales de una fábrica de cemento ubicada en Cataluña, llevar a cabo un balance cuantitativo completo de la energía y los recursos consumidos (entradas), y de las emisiones y residuos generados (salidas) durante el proceso de fabricación de 1 tonelada de cemento portland.

- Desglosar el inventario con el máximo detalle operativo según las fases de fabricación para poder asignar a cada fase las entradas y salidas correspondientes.
- Analizar los datos obtenidos junto con el sistema productivo para poder identificar, por una parte, el consumo y las emisiones más importantes del sistema; y, por otra, las fases del proceso en que este consumo y emisiones son más relevantes.
- Confirmar la fiabilidad de los resultados obtenidos mediante su comparación con inventarios de otros estudios análogos ya existentes. Se quiere comprobar la consistencia de los datos obtenidos en cada parte del proceso, observando que la suma de los valores de cada parte es similar al valor total del proceso completo como muestran los otros informes precedentes.

6.3 - ÁMBITO DEL SISTEMA ANALIZADO

El sistema analizado se define como *la fabricación de 1 tonelada de cemento portland*, y engloba desde la obtención de las materias primas o el transporte hasta el lugar de su manipulación, la preparación de los componentes, y finalmente, la obtención del cemento a punto para ser distribuido en el mercado.

Las entradas del sistema que se computan son las principales materias primas consumidas y el total del consumo energético; como salidas, los principales residuos y emisiones al medio; y como producto, el cemento portland.

Los límites del sistema responden al tipo de análisis *de cuna a puerta* ya que se acaba cuando el cemento ya está ensacado o listo para la carga a granel y empieza con la obtención de las principales materias primas para poder fabricar el cemento portland, esto es, en el momento de la extracción de los áridos de las canteras (caliza, arcilla y arenisca). El corrector de hierro, puesto que se obtiene a partir de un subproducto de otro material (son las laminillas sobrantes de la fabricación de viguetas), se contabiliza a partir del transporte desde el punto de suministro hasta la fábrica de cemento.

Otras materias primas consideradas como los explosivos utilizados en las canteras o el papel de los sacos de cemento, no se evalúan desde el inicio de su propia producción sino que se contabilizan desde el producto como tal, porque se considera, como criterio, que no resulta relevante en el proceso en estudio.

Por lo que respecta a la energía eléctrica y al gasóleo, si bien se toma como entrada el consumo de 1 MJ o 1 litro respectivamente; indirectamente también se toman en consideración

las emisiones que generan desde su producción, ya que los datos que se han utilizado provienen de bases de datos ya existentes que así lo contabilizan.

6.4 - ANÁLISIS DEL INVENTARIO (ICV)

6.4.1 - Introducción

Como ya se ha comentado con anterioridad, el sistema en estudio: *Fabricación del cemento portland*, toma como modelo una fábrica de cemento ya existente, situada en Cataluña. En este apartado se describe detalladamente la elaboración de la parte clave del ACV: el inventario.

Es básico distinguir, entre los datos que componen el inventario, los *datos de entrada* y los *datos de salida*. Dentro de los datos de entrada se incluyen los *recursos materiales* y la *energía*; dentro de los de salida se incluyen las *emisiones* (en el aire, agua y suelo) y los *residuos*.

Los datos de base a partir de los que se ha elaborado el inventario, por lo que respecta al consumo de recursos materiales y al consumo energético, han estado aportadas por los técnicos de la fábrica, así como también los datos sobre las emisiones del horno de cemento. Son datos que se han facilitado en valor absoluto y que han sido recalculados a partir de consideraciones que se exponen más adelante, hasta mostrarlas como un *resultado* referenciado a la unidad analítica: *1 tonelada de cemento portland*.

Los resultados obtenidos se definen dentro de un rango que quiere tener en cuenta las variaciones reales de los recursos. Estas variaciones se exponen también más adelante.

Se ha estudiado el caso particular del cemento portland, concretamente con un 0% de adiciones (es decir, sólo con clinker y yeso estabilizador) para obtener un valor de fácil interpretación. Es, además, una unidad más útil que el cemento "en general" ya que, a partir de ésta siempre se puede evaluar los resultados para cualquier tipo de cemento concreto de una manera sencilla: a partir de su contenido en adiciones. Recordemos la clasificación de los diferentes cementos que contempla la Norma UNE 80 301:96/RC-97 (véase tabla 6.1).

Las fases de producción que se tienen en cuenta son prácticamente todas las que se siguen en la fábrica en estudio. En el anexo 4 se encuentra la descripción gráfica del sistema considerado, de forma detallada y con el formato de diagrama de flujo que permite el seguimiento real del proceso. En el diagrama también se encuentran los datos de entrada y de salida. A continuación, en las figuras 6.1 y 6.2, se exponen de forma simplificada los diagramas de flujo que representan el sistema estudiado.

Tipo	Intervalo de % clinker	Intervalo de % adiciones
CEM I	95 a 100	0 a 5
CEM II / A	80 a 94	6 a 20
CEM II / B	65 a 79	21 a 35
CEM III / A	35 a 64	36 a 65
CEM III / B	20 a 34	66 a 80
CEM IV / A	65 a 89	11 a 35
CEM IV / B	45 a 64	36 a 55
CEM V / A	40 a 64	36 a 60

Tabla 6.1- Composición de los diferentes tipos de cementos según la Norma UNE 80 301:96/RC-97

6.4.2 - Datos de entrada

6.4.2.1 - Recursos materiales

Datos y Resultados

Los recursos materiales básicos que se consumen durante la fabricación del cemento se pueden dividir en dos subgrupos: por una parte observamos las materias primas a partir de las cuales se pueden obtener el cemento portland (caliza, arcilla, arenisca, corrector de Fe y yeso); y por otra, tenemos el resto de recursos que son necesarios para llevar a cabo el proceso y a los que denominaremos recursos auxiliares. A continuación se exponen los datos suministrados por los técnicos de la fábrica, tablas 6.2 y 6.3:

Material	Valor mínimo	Valor máximo
Caliza (t caliza/t crudo)	0.65	0.80
Arcilla (t arcilla/ t crudo)	0.10	0.30
Arenisca (t arenisca/ t crudo)	0.02	0.10
Corrector Fe (t corr.Fe/ t crudo)	0.01	0.01
Yeso (t yeso / t cemento)	0.03	0.035

Tabla 6.2 - Consumo de materias primas

Recurso auxiliar	Valor
Goma2 (g / t caliza)	24
Goma2 (g / t arenisca)	36
Anagolita (g / t caliza)	96
Anagolita (g / t arenisca)	204
Papel (g / saco cemento)	67-130
Madera de palets (kg mad./palet)	3-15
Plástico (kg / bolsa sacos)	1.57

Tabla 6.3 - Consumo de recursos auxiliares

Seguidamente se presentan los resultados referenciados a 1 tonelada de cemento portland, si bien, previamente es necesario exponer las causas que dan lugar al rango de variación de los valores:

1. La variación, en tanto por ciento, de los diferentes tipos de materiales que componen el crudo (véase tabla 6.4).

Material	Valor mínimo	Valor máximo
Caliza	65%	80%
Arcilla	10%	30%
Arenisca	2%	10%
Corrector de Fe	1%	1%

Tabla 6.4 - Márgenes de composición del crudo

2. La variación de la relación: toneladas de crudo consumidas para fabricar 1 tonelada de clinker. Esta relación oscila entre el 1,5 - 1,6 t crudo /t clinker.
3. La variación de la cantidad de yeso que se incorpora al clinker: 0,03 - 0,035 t yeso /t cemento.

Por tanto, como se está evaluando el cemento portland con un 0% de adiciones y un 3-3,5% de yeso, la relación entre clinker y cemento queda: 0,965-0,97 t clinker por cada 1 t cemento portland.

Así pues, a partir de estos datos iniciales, y teniendo en cuenta los rangos de variación mencionados, se pueden obtener los valores resultantes del consumo referenciado a la unidad

analítica en las tablas 6.5 y 6.6. Los cálculos para obtener estos valores se encuentran en el anejo 4.

Material	Valor mínimo (kg./ t cemento)	Valor máximo (kg./ t cemento)
Caliza	941	1240
Arcilla	145	466
Arenisca	29	155
Corrector de Fe	14	16
yeso	30	35

Tabla 6.5 - Consumo de materias primas por tonelada de cemento

Recurso auxiliar	Valor mínimo	Valor máximo
Goma2 – caliza (g / t cemento)	22,6	29,8
Goma2 -arenisca (g / t cemento)	1,04	5,59
Anagolita –caliza (g / t cemento)	90,3	119
Anagolita –arenisca (g / t cemento)	5,91	31,7
Papel (kg./ t cemento)	2.59	2.59
Madera (kg. / t cemento)	6	6
Plástico (kg. / t cemento)	1.05	1.05

Tabla 6.6 - Consumo de recursos auxiliares por tonelada de cemento

6.4.2.2 - Recursos energéticos

Datos y Resultados

Por lo que respecta al consumo energético, cabe distinguir entre energía eléctrica (kwh) y energía proporcionada por combustibles fósiles (gasóleo para la maquinaria y carbón para el quemador del horno).

Los datos del consumo energético de la maquinaria utilizada en la fabricación del cemento en kw, litros por hora y toneladas por hora, respectivamente, así como del rendimiento de esta maquinaria han sido proporcionadas por los técnicos de la fábrica. Cabe matizar que el rendimiento de esta maquinaria utilizada en las canteras ha sido proporcionado implícitamente a través de los datos de producción (véase tabla 6.7).

El rendimiento variable de la producción de las canteras de materia prima es otro de los factores causantes de la obtención de valores máximos y mínimos.

Producción de las canteras		Caliza	Arenisca	Arcilla
Producción t/h áridos	máximo	650	125	250
	mínimo	550	100	200

Tabla 6.7- Rendimiento de producción de las canteras

En las siguientes tablas 6.8, 6.9 y 6.10 se exponen los consumos energéticos, agrupados según las fases de la fabricación de cemento:

CANTERAS	Perforadora	Martillo hidráulico	Pala Cargadora	Excavadora hidráulica	Dúmper	Camión
gasóleo (l/h)	40	60	50	85	25	48

Tabla 6.8 - Consumo de gasóleo por maquinaria de la cantera

Fases	Consum(kw)	Producción
Trituración 1ª de la caliza	1250	550-650 t/h caliza
Trituración 2ª de la caliza	650	250 t/h caliza
Prehomog. de la calcària	110	300 t/h caliza
Trituración de la arcilla	350	300 t/h arcilla
Prehomog. de l'argila	77,5	200 t/h arcilla
Trituración del arenisca	214	125 t/h arenisca
Tratamiento del arenisca	22	200 t/h crudo
Tratamiento del corr. Fe	22	200 t/h crudo
Trituración del crudo	4968	200 t/h crudo
Cocción del crudo	3350	100 t/h clínker
Fabricación del cemento	4305	120 t/h cemento
Empaquetado del cemento	390	600-900 t/h cemento
Preparación del carbón	1300	35 t/h carbón
Trituración 1ª de la caliza	1250	550-650 t/h caliza

Tabla 6.9 - Consumo de energía eléctrica y producción por fases

Horno	kg combustibles /kg clinker	kcal/kg clinker
Quemador del horno	0,1085	825

Tabla 6.10 - Consumo térmico del quemador del horno

Por lo que respecta al combustible fósil que se utiliza en el quemador del horno de la fábrica en estudio, cabe puntualizar que está compuesto por un 40% de hulla y un 60% de coque (véase tabla 6.11), de manera que el combustible resultante tiene un poder calorífico de 7600 kcal/kg.

Combustible	Poder calorífico (kcal/kg.)	Proporción de la composición
Hulla	6.600	40%
Coque	8.200	60%

Tabla 6.11- Características del combustible del quemador del horno.

Finalmente, se quiere hacer constar que los datos de consumo eléctrico están sujetos a una variación difícil de precisar, pero que se ha establecido según las indicaciones de los técnicos de la fábrica en un $\pm 5\%$.

Así pues, de la misma forma que se ha hecho con el consumo de recursos materiales, a partir de estos datos iniciales y teniendo en cuenta también los rangos de variación mencionados, se han obtenido los valores del consumo energético referenciado en la unidad 1 tonelada de cemento portland (véase tabla 6.12, 6.13 y 6.14).

En la tabla 6.12 se expone el consumo en litros de gasóleo y en MJ. La equivalencia utilizada es de 41 MJ/kg de fuel-oil pesado, que corresponde a su poder calorífico [UPM, 1989], a la que se tiene que añadir, para completar la conversión, la relación 0.94 kg/l gasóleo, que es el peso específico del gasóleo a 15°C.

A partir de las tablas 6.12 y 6.13, tomando los valores medios se ha configurado el gráfico 6.1, donde se aprecia que de todas las fases, las que más consumen (y de forma diferenciada) son las de la trituración del crudo, cocción del crudo y preparación del cemento, debido al elevado consumo eléctrico del molino de crudo, del horno y del molino de cemento respectivamente. Incluyendo la tabla 6.14, se ha configurado el gráfico 6.2 que muestra el consumo energético, absoluto y en tanto por ciento, de las fases agrupadas como en la figura 6.2, tanto de gasóleo como de electricidad como del combustible del horno. Finalmente, el gráfico 6.3 muestra el consumo particular del horno de electricidad y de combustible fósil.

CONSUMOS		l gasóleo/t cemento	MJ/t cemento
Canteras caliza	máx	0,587	22,6
	mín	0,376	14,5
Canteras arcilla	máx	0,314	12,1
	mín	0,078	3,01
Canteras arenisca	máx	0,272	10,5
	mín	0,041	1,56
Camión caliza	máx	1,120	43,2
	mín	0,852	32,8
Camión arcilla	máx	0,149	5,74
	mín	0,046	1,77
Camión arenisca	máx	0,052	2,00
	mín	0,010	0,385
Camión Corrector Fe	máx	0,019	0,732
	mín	0,017	0,655

Tabla 6.12 - Consumo de gasóleo por tonelada de cemento

CONSUMOS	MJ/t CEMENTO	
Trituración de la caliza	máx	22,9
	mín	14,6
Prehomo. de la caliza	máx	1,72
	mín	1,18
Prehomo. de la arcilla	máx	2,74
	mín	0,769
Tratamiento de la arenisca y del corrector de Fe	máx	2,29
	mín	1,26
Trituración del crudo	máx	145,7
	mín	123,0
Cocción del crudo a clínker	máx	122,8
	mín	110,6
Preparación del cemento	máx	135,6
	mín	122,7
Expedición del cemento	máx	1,76
	mín	1,60
Preparación del carbón	máx	14,8
	mín	13,3

Tabla 6.13 - Consumo de energía eléctrica por fase de la producción de cemento

CONSUMO	MJ/t CEMENTO	
	Combustible del horno (coque+hulla)	máx
	mín	3.331,5

Tabla 6.14 - Consumo de energía térmica en el horno de clinker

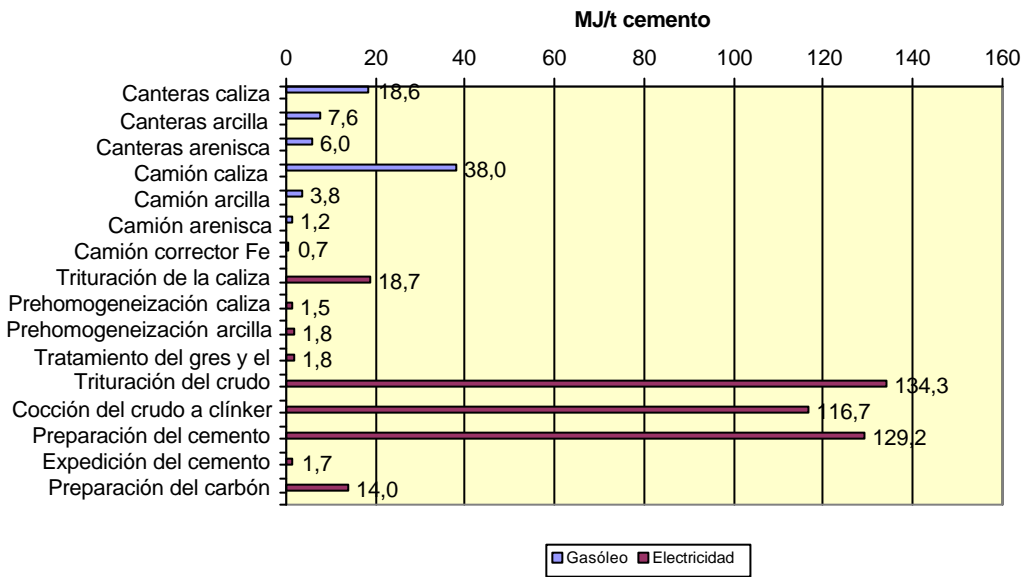


Gráfico 6.1 - Consumo de gasóleo y electricidad

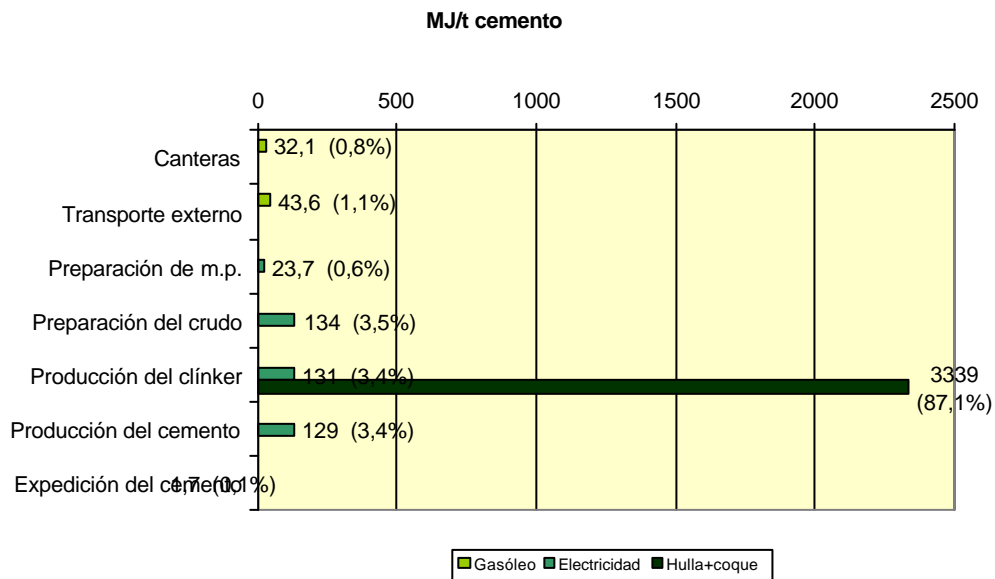


Gráfico 6.2 - Consumo de gasóleo, electricidad y combustible del horno (hulla+coque)

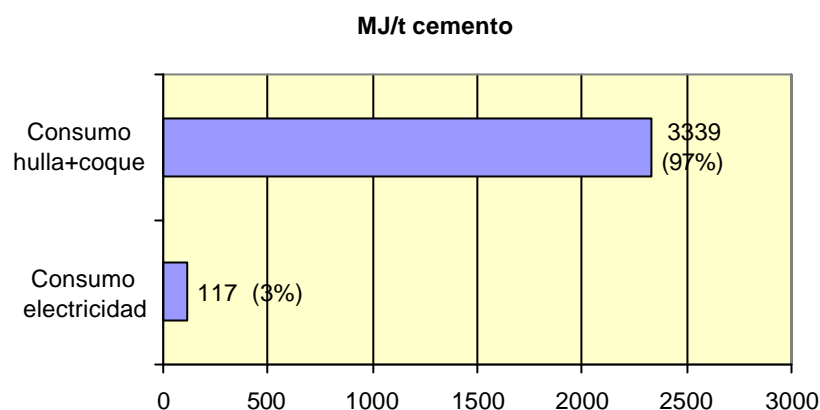


Gráfico 6.3 - Consumo del horno de clinker de energía fósil y eléctrica

6.4.3 – Datos de salida

6.4.3.1 - Emisiones

Las emisiones de gases y compuestos, en general, se producen básicamente por dos factores:

1. La fabricación y el consumo de energía (eléctrica o gasóleo)
2. Las reacciones químicas que sufren las materias primas y el carbón, principalmente cuando se encuentran dentro del horno, durante la clinkerización. En particular, cabe destacar la descarbonatación de la caliza.

Durante estos procesos se liberan al agua, a la atmósfera y al suelo una gran cantidad de gases, elementos y compuestos, pero es necesario advertir que no todas las emisiones son significativas, ya sea por la poca toxicidad de la sustancia o ya sea porque se emite una cantidad ínfima.

Los compuestos liberados son capaces de causar determinados impactos ambientales en mayor o menor grado, según la cantidad que se haya emitido. El criterio seguido en el momento de escoger los compuestos a tener en cuenta en el presente estudio es el siguiente: por las emisiones debidas al primer factor se han escogido aquellos compuestos que son los principales causantes del efecto invernadero, la acidificación, la eutrofización, la formación fotoquímica de ozono (o contaminación de verano), la contaminación de invierno y la emisión de metales pesados en el medio. De las emisiones del segundo factor, ya que tan solo disponemos de los principales, se analizan todas.

Es importante clarificar que las emisiones producidas por el combustible del horno (hulla+coque) no se consideran de forma independiente como una fuente más de energía porque los gases producidos por el combustible no se liberan directamente a la atmósfera. El quemador del horno se encuentra dentro del mismo, y los gases emitidos interaccionan con los liberados durante la cocción del crudo, por este motivo las emisiones del combustible se encuentran incluidas dentro de las reacciones químicas.

Tradicionalmente, en los estudios sobre la fabricación del cemento siempre se han considerado como principales los tres gases siguientes: el CO₂, el NO_x y el SO₂ básicamente por dos razones:

La primera porque son los gases que se emiten en mayor cantidad absoluta a la atmósfera. Pero éste es un criterio cuestionable (ante todo por lo que respecta al NO_x y al SO₂, ya que las emisiones de CO₂ sí que son comparativamente muy altas) puesto que las cantidades absolutas de dos compuestos diferentes no se pueden comparar. La emisión de un compuesto más tóxico que otro puede ser más perjudicial aunque se liberen menos gramos por metro cúbico.

La segunda razón es la falta de datos. Como la normativa existente hasta ahora sólo ha limitado las emisiones de SO₂, de NO_x y las de partículas, tan solo se han controlado éstas últimas y son de las únicas de las que se tienen datos.

Emisiones durante la fabricación y consumo de energía

Las emisiones correspondientes a la fabricación y consumo de energía pertenecen a bases de datos ya existentes, concretamente a la base de datos del programa informático SimaPro 4.0.

Por lo que respecta a la energía eléctrica, se trata de las cantidades de compuestos emitidos durante la fabricación y consumo de 1 MJ de energía eléctrica en España. En el anexo 4 se encuentra la tabla con la información completa de todas las emisiones liberadas. El patrón de emisiones correspondientes a la producción y consumo de 1kg de gasóleo se encuentra también en el mismo anexo.

La importancia de los compuestos a la hora de causar un determinado impacto es relativa, no sólo a la cantidad emitida sino también a su tipología. El programa SimaPro 4.0 propone una serie de factores (llamados factores de caracterización), que pretenden hacer posible la equiparación de los diferentes compuestos. Este mecanismo corresponde a la fase llamada *Caracterización* del ACV como explicado en el apartado 2.4.3.3 del capítulo 2. Mediante la multiplicación de estos factores por la cantidad emitida real, se obtienen las cantidades de los

diferentes compuestos convertidas a una unidad patrón, que se pueden comparar para valorar en qué grado son causantes de determinado impacto.

Esto es lo que se ha hecho con las emisiones producidas durante la fabricación y consumo de la energía eléctrica y el gasóleo. De los resultados caracterizados, se han escogido las emisiones que tienen un peso proporcional más relevante. Estas emisiones son: dióxido de carbono CO₂; óxidos de nitrógeno NO_x (que incluye NO y NO₂); dióxido de azufre SO₂, hidrocarburos C_xH_y, compuestos orgánicos volátiles sin metano VOC; polvo; hollín (en inglés *soot*); metales¹; cadmio Cd; y plomo Pb.

En las tablas 6.15 y 6.16 se muestran los compuestos que finalmente se evalúan y su representatividad, en tanto por ciento, respecto al total de los gases causantes del mismo impacto.

Es necesario puntualizar que las emisiones producidas durante la fabricación de la energía, aunque aquí se consideren conjuntamente con el resto, en realidad se producen en el punto donde realmente se fabrica esta energía. Los datos obtenidos referentes a las emisiones producidas por energía corresponden a los valores sumados de la fabricación más el consumo, por tanto, se asume la incorrección que se realiza a la hora de contabilizar conjuntamente (fabricación y consumo) las emisiones que tienen impactos regionales y locales.

Emisiones	Cantidad (mg)	Efecto invernadero	Acidificación	Eutrofización	Contaminación de verano	Contaminación de Invierno	Metales pesados
CO ₂	147000	97%					
NO _x	327		23%	99%			
SO ₂	770		77%			78%	
VOC	66,6				88%		
Polvo	214					22%	
Metales							98%

Tabla 6.15 - Emisiones de los principales contaminantes, durante la fabricación y consumo de 1 MJ de energía eléctrica en España e importancia (en % respecto al resto de emisiones) de su impacto ambiental.

¹ En el listado de emisiones de la base de datos del programa SimaPro 4.0, se incluye este elemento (*metales*) sin especificar de qué metal se trata.

Emisiones	Cantidad (g)	Efecto Invernadero	Acidificación	Eutrofización	Contaminación de Verano	Contaminación de Invierno	Metales pesados
CO₂	3408,9	100%					
NO_x	52,7		88%	100%			
SO₂	5,0		12%			52%	
C_xH_y	10,7				89%		
Hollín	4,3					44%	
Metales	0,001						15%
Cd	71E-6						53%
Pb	0,002						32%
Polvo	0,340					4%	

Tabla 6.16 - Emisiones de los principales contaminantes, durante la producción y consumo de 1 kg de gasóleo e importancia (en % respecto al resto de emisiones) de su impacto ambiental.

En el anejo 4 se encuentran las tablas donde se muestran los principales compuestos causantes de los impactos considerados (efecto invernadero, acidificación, eutrofización, formación fotoquímica de ozono, contaminación de invierno y emisión de metales pesados al medio) con sus respectivos factores de caracterización, así como la unidad patrón que se utiliza para cada uno. También se recogen las tablas con la caracterización de las emisiones de electricidad y gasóleo.

Finalmente, en las tablas 6.17.1 y 6.17.2 se recogen los resultados de las emisiones de los principales contaminantes que se liberan en cada fase debidas al consumo energético, tanto eléctrico como de gasóleo. Los cálculos, así como el total de emisiones para cada fase, se encuentran en el anejo 4.

A partir de las tablas 6.17.1 y 6.17.2, tomando los valores medios se han configurado los gráficos 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.8 y 6.11 donde se presentan las emisiones por cada fase de los diferentes compuestos.

En los gráficos 6.4, 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 y 6.11 se aprecia que de todas las fases consideradas, las que más liberan dióxido de carbono, dióxido de azufre, compuestos volátiles orgánicos, polvo, metales, cadmio y plomo, respectivamente, y de forma diferenciada, son las de la trituración del crudo, cocción del crudo y preparación del cemento, debido al elevado consumo eléctrico del molino del crudo, del horno y del molino del cemento, como ya se ha comentado con anterioridad. El polvo que se genera en las canteras es importante, pero no se ha contabilizado porque no se puede hacer ningún tipo de control puesto que se produce en grandes espacios al aire libre y la mayor parte se vuelve a depositar prácticamente dentro del espacio de la cantera.

En el gráfico 6.5 se pueden comentar dos situaciones: por una parte se libera una mayor cantidad de NO_x en las fases cantera de caliza y camión de caliza, debido al consumo de gasóleo, ya que este combustible emite una cantidad considerable de este gas; y por otra, se repite la situación provocada por el alto consumo de energía eléctrica de los molinos del horno.

En los gráficos 6.7 y 6.8 las mayores emisiones de hidrocarburos y de hollín se producen debido al consumo de gasóleo que libera unas cantidades considerables de estos compuestos. Y las fases en que se consume más por tonelada de cemento son las de la cantera y de la caliza y el camión que la transporta a la fábrica.

EMISIONES	Rango	g CO ₂	g NO _x	g SO ₂	g CxHy	g VOC
Canteras caliza	máx	2129	32,9	3,15	6,72	
	mín	1365	21,10	2,020	4,30	
Trituración de la caliza	máx	3361	7,48	17,6	0,046	1,52
	mín	2139	4,758	11,20	0,029	0,969
Camión caliza	máx	4062	62,8	6,01	12,8	
	mín	3090	47,8	4,57	9,73	
Prehomogeneización caliza	máx	253	0,563	1,33	0,003	0,115
	mín	173	0,386	0,908	0,002	0,079
Canteras arcilla	máx	1140	17,6	1,69	3,59	
	mín	283	4,38	0,419	0,893	
Camión arcilla	máx	540	8,35	0,80	1,70	
	mín	167	2,58	0,247	0,526	
Prehomogeneización arcilla	máx	402	0,894	2,11	0,006	0,182
	mín	113	0,252	0,592	0,002	0,051
Canteras arenisca	máx	985	15,2	1,46	3,10	
	mín	147	2,27	0,217	0,463	
Camión arenisca	máx	189	2,92	0,279	0,594	
	mín	36,3	0,561	0,054	0,114	
Tratamiento de la arenisca	máx	243	0,539	1,27	0,003	0,110
	mín	105	0,233	0,550	0,001	0,048
Camión corrector Fe	máx	68,9	1,07	0,102	0,217	
	mín	61,6	0,953	0,091	0,194	
Tratamiento del corrector Fe	máx	94,9	0,211	0,497	0,001	0,043
	mín	80,0	0,178	0,419	0,001	0,036
Trituración del crudo	máx	21422	47,7	112	0,294	9,71
	mín	18076	40,2	94,7	0,248	8,19
Cocción del crudo: Consumo eléctrico	máx	18056	40,2	94,6	0,248	8,18
	mín	16252	36,2	85,1	0,223	7,36
Preparación del cemento	máx	19934	44,3	104	0,273	9,03
	mín	18036	40,1	94,5	0,247	8,17
Expedición del cemento	máx	259	0,58	1,36	0,004	0,117
	mín	235	0,52	1,23	0,003	0,106
Preparación del carbón	máx	2172	4,83	11,4	0,030	0,984
	mín	1955	4,35	10,2	0,027	0,886

Tabla 6.17.1 - Emisiones en las diferentes fases de fabricación del cemento.

EMISIONES	Rango	g Polvo	g Hollín	mg metales	mg Cd	mg Pb
Canteras caliza	máx	0,212	2,68	0,624	0,045	1,34
	mín	0,136	1,72	0,400	0,03	0,858
Trituración de la caliza	máx	4,89		209	0,171	11,4
	mín	3,11		133	0,109	7,26
Camión caliza	máx	0,405	5,11	1,19	0,085	2,55
	mín	0,308	3,88	0,906	0,065	1,94
Prehomogeneización caliza	máx	0,368		15,7	0,013	0,859
	mín	0,252		10,8	0,009	0,589
Canteras arcilla	máx	0,114	1,43	0,334	0,024	1,34
	mín	0,028	0,356	0,083	0,029	0,858
Camión arcilla	máx	0,054	0,679	0,159	0,011	0,340
	mín	0,017	0,210	0,049	0,003	0,105
Prehomogeneización arcilla	máx	0,585		25,0	0,020	0,824
	mín	0,165		7,02	0,006	0,356
Canteras arenisca	máx	0,098	1,24	0,289	0,021	0,619
	mín	0,015	0,185	0,043	0,003	0,092
Camión arenisca	máx	0,019	0,237	0,055	0,004	0,119
	mín	0,004	0,046	0,011	0,001	0,023
Tratamiento de la arenisca	máx	0,353		15,1	0,012	0,824
	mín	0,153		6,52	0,005	0,356
Camión corrector Fe	máx	0,007	0,087	0,020	0,001	0,043
	mín	0,006	0,078	0,018	0,001	0,039
Tratamiento del corrector Fe	máx	0,138		5,89	0,005	0,322
	mín	0,117		4,97	0,004	0,272
Trituración del crudo	máx	31,2		1330	1,091	72,7
	mín	26,3		1123	0,921	61,4
Cocción del crudo: Consumo eléctrico	máx	26,3		1121	0,920	61,3
	mín	23,7		1009	0,828	55,2
Preparación del cemento	máx	29,0		1238	1,016	67,7
	mín	26,3		1009	0,919	61,2
Expedición del cemento	máx	0,377		16,1	0,013	0,881
	mín	0,342		14,6	0,012	0,797
Preparación del carbón	máx	3,16		135	0,111	7,38
	mín	2,85		121	0,100	6,64

Tabla 6.17.2 - Emisiones en las diferentes fases de fabricación del cemento.

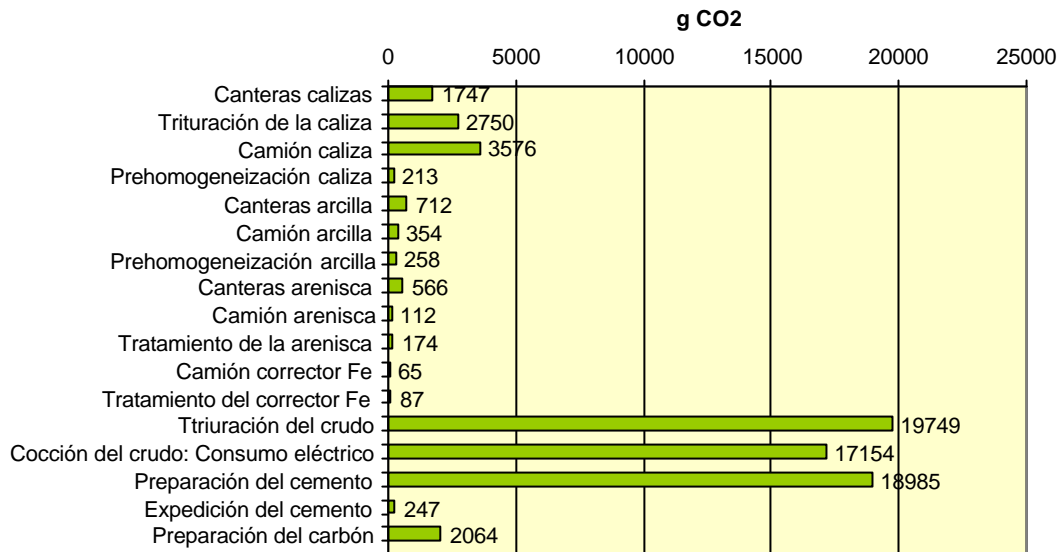


Gráfico 6.4 - Emisiones de CO₂ /t cemento debidas al consumo eléctrico y de gasóleo de cada fase.

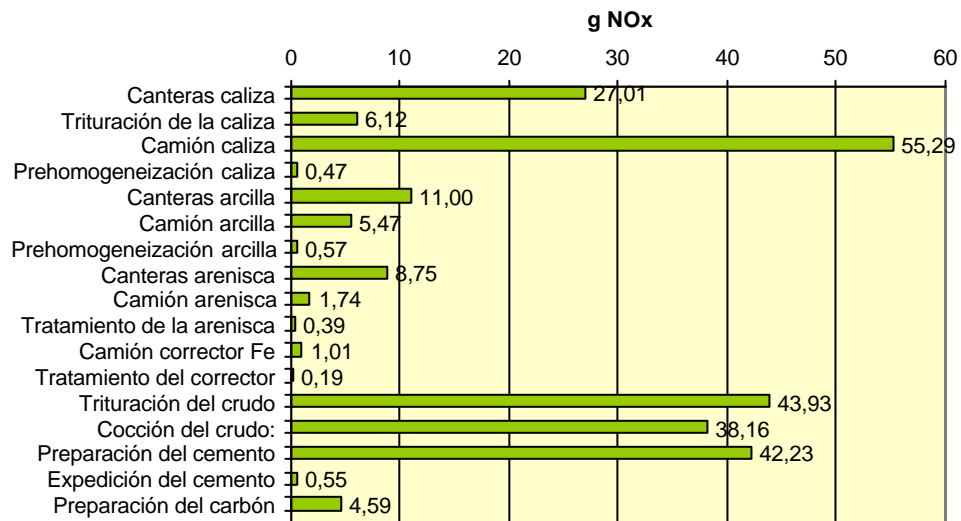


Gráfico 6.5 - Emisiones de NO_x /t cemento debidas al consumo eléctrico y de gasóleo de cada fase.

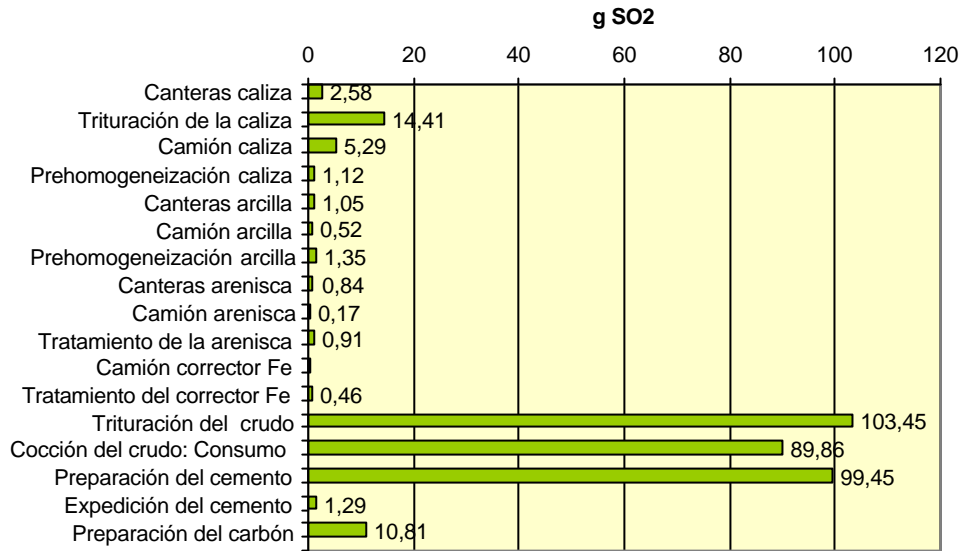


Gráfico 6.6 - Emisiones de SO_2 /t cemento debidas al consumo eléctrico y de gasóleo de cada fase

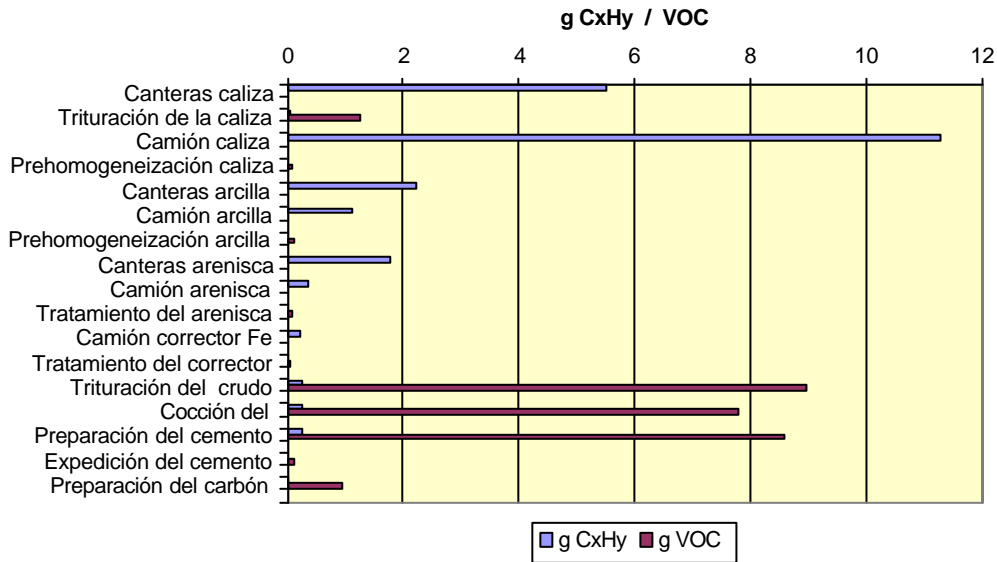


Gráfico 6.7 - Emisiones de CxHy y VOC /t cemento debidas al consumo eléctrico y de gasóleo por cada fase

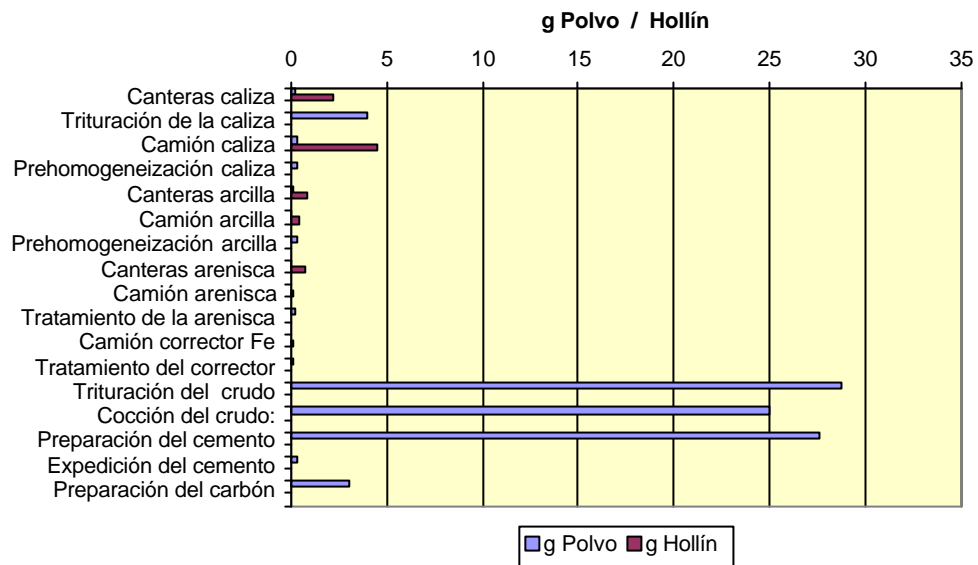


Gráfico 6.8 - Emisiones de polvo y hollín /t cemento debidas al consumo eléctrico y de gasóleo de cada fase.

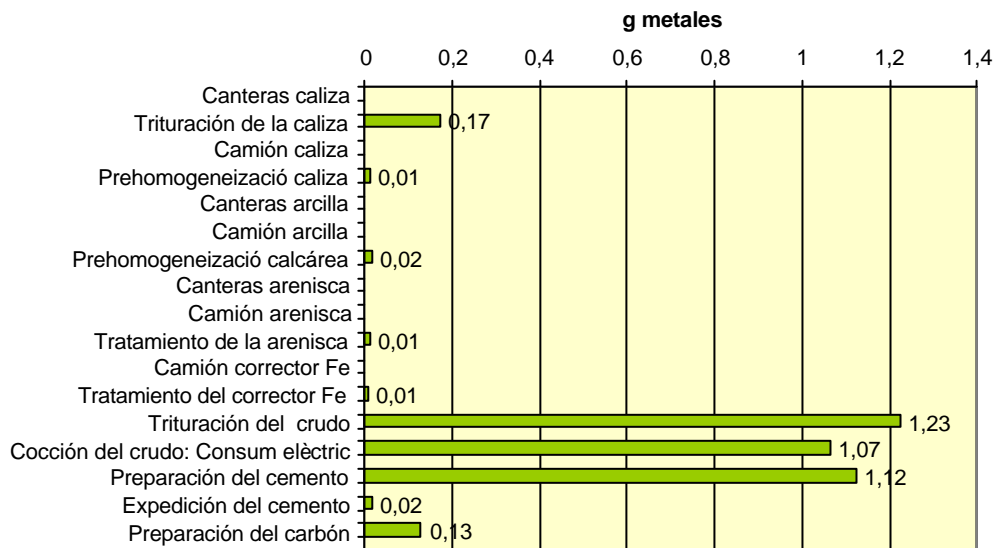


Gráfico 6.9 - Emisiones de metales pesados /t cemento debidas al consumo eléctrico y de gasóleo de cada fase.

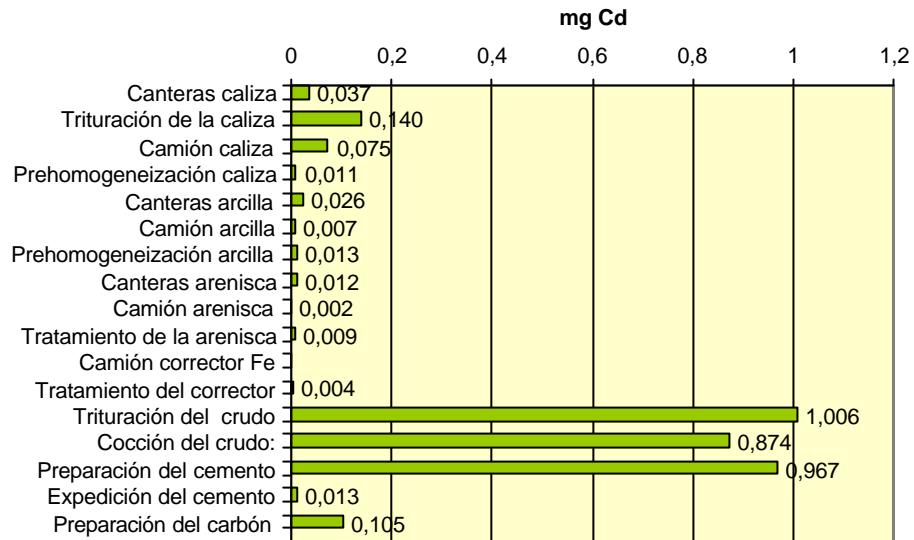


Gráfico 6.10 - Emisiones de cadmio /t cemento debidas al consumo eléctrico y de gasóleo de cada fase.

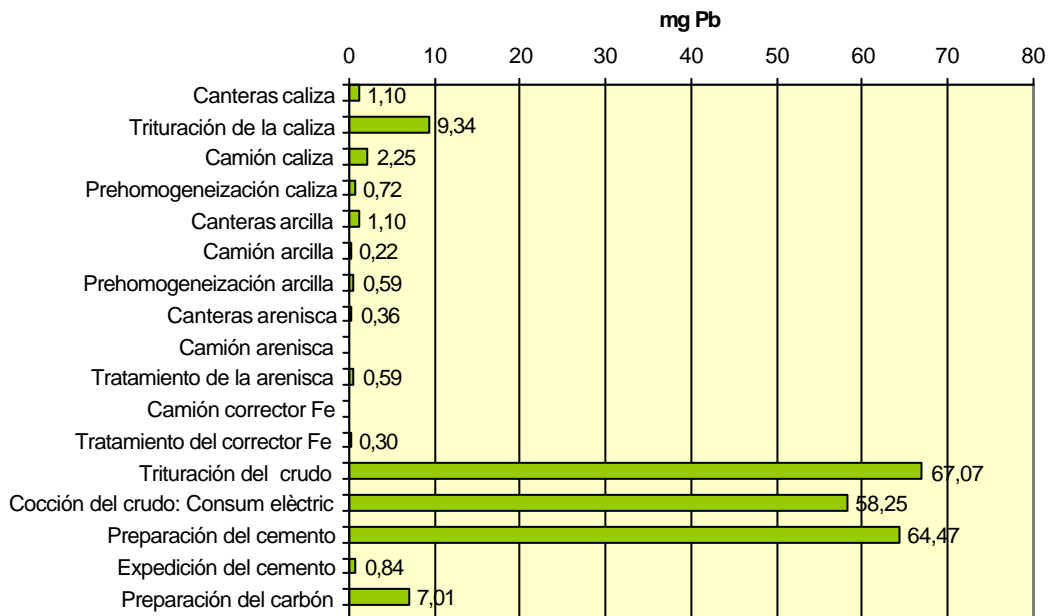


Gráfico 6.11 - Emisiones de plomo /t cemento debidas al consumo eléctrico y de gasóleo de cada fase

Emisiones durante las reacciones químicas en el horno

Los gases que salen del horno de cemento contienen principalmente nitrógeno N_2 , dióxido de carbono CO_2 , oxígeno O_2 y vapor de agua H_2O . Además, pueden contener pequeñas cantidades de compuestos de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO , NO_2), monóxido de carbono (CO) y ácido sulfhídrico (H_2S). [Labahn et al., 1985]

El azufre que contienen las materias primas y el combustible se oxida en forma de SO_2 a temperaturas por encima de $1000\text{ }^\circ\text{C}$, en presencia de exceso de aire. Este compuesto reacciona con los álcalis del crudo que se volatilizan simultáneamente formando sulfatos alcalinos, con menos volatilidad y que se descargan del horno con el clinker o las partículas de polvo. Si existe un exceso de álcalis, una alta proporción del azufre total (88-100%) introducido en el sistema del horno se combina con el clinker del cemento y el polvo del horno, de modo que en tal caso sólo una pequeña proporción (menos del 12%) se emite como SO_2 . [Labahn et al., 1985]

El monóxido de carbono CO y el sulfuro de hidrógeno H_2S se forman únicamente en condiciones de combustión incompleta, con todo, en pequeñas cantidades.

Con exceso de aire se pueden formar óxidos de nitrógeno, especialmente el NO y el NO_2 , en una proporción volumétrica de 90 y 10%, respectivamente.

No aparecen cloruros o fluoruros gaseosos en los gases de salida del horno ya que las pequeñas partes de cloro y de flúor que contiene el crudo se combinan con los álcalis, el calcio del clinker y el polvo en el curso de los procesos cíclicos del horno. [Labahn et al., 1985]

Las emisiones correspondientes a las reacciones químicas en el caso en estudio han sido facilitadas por los técnicos de la fábrica, excepto la emisión de CO_2 debida a la descarbonatación de la caliza, que se ha calculado estequiométricamente.

En primer lugar, es necesario decir que el punto de la fábrica donde se hace este control es el horno de clinker. El control de las emisiones reales es complejo. El modelo teórico del que se dispone no sirve porque es demasiado genérico y no contempla las reacciones internas y los equilibrios dentro del horno, sobre todo en el caso de los elementos minoritarios. La realidad es difícilmente modelable porque en la práctica intervienen múltiples variables que no se pueden prever a priori y que modifican los resultados. Las características físicas de la materia prima que entra en el horno (tanto el crudo como el combustible) se controlan para que sean las adecuadas para la fabricación del cemento; pero cabe advertir que siempre se trabaja dentro de unos márgenes aceptables, ya que estos materiales, lógicamente, no tienen siempre una composición

idéntica, y de la cual dependen determinados factores, como por ejemplo la temperatura que se consigue dentro del horno, que repercuten en las emisiones liberadas.

El control real de las emisiones liberadas por los gases del horno se hace, en la práctica, mediante mediciones periódicas de la concentración de ciertos compuestos en la chimenea de salida a la atmósfera, después de los filtros electrostáticos. Es importante puntualizar que este control es parcial, ya que tan solo se controlan determinados compuestos: el porcentaje de O_2 , la emisión de partículas (polvo), de NO_x , de SO_2 y de CO . Paradójicamente, en cambio, no se miden las emisiones del gas más contaminante (porque se emite en mayor cantidad): el dióxido de carbono, CO_2 . La razón por la que no se mide el CO_2 es porque no existe ninguna normativa que limite su emisión. En cambio, sí que existen unos límites máximos regulados por ley de emisiones de NO_x y SO_2 , aunque han quedado desfasados y resultan excesivamente permisivos. Actualmente está en preparación una normativa europea que se prevé que se ajuste más a las posibilidades reales.

De las emisiones debidas a las reacciones químicas del horno, se analizan los siguientes compuestos:

- Dióxido de Carbono CO_2
- Óxidos de nitrógeno NO_x
- Dióxido de azufre SO_2
- Polvo

El valor de las emisiones totales de CO_2 a la salida del horno se ha tomado del modelo teórico proporcionado por los técnicos de la fábrica, ya que no se dispone de mediciones reales. Los valores de las emisiones de polvo, NO_x y SO_2 que se han tomado para el inventario corresponden a la media de una serie de cinco controles puntuales realizados por el laboratorio contratado. Estos valores se encuentran en el anexo 4. Su grado de dispersión confirma las múltiples variables que determinan las emisiones.

La razón por la que se estudian estos compuestos es porque son los tradicionalmente considerados en la fabricación de cemento (y son, pues, los que se encuentran en otros inventarios), y sobretodo por falta de más datos, ya que los controles del laboratorio sólo miden NO_x , SO_2 , CO y polvo.

Las emisiones de CO_2 debidas a las reacciones químicas dentro del horno se deben a dos procesos diferenciados:

- El consumo del combustible

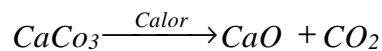
- La descarbonatación de la caliza.

Este último genera la mayor cantidad de dióxido de carbono, por lo que se ha calculado independientemente mediante la reacción de equilibrio químico, cálculo que se desarrolla a continuación:

En este punto es necesario aportar un nuevo dato facilitado nuevamente por los técnicos de la fábrica- que es el % de carbonato de calcio (CaCO₃) que finalmente contiene el crudo cuando entra en el horno. Éste es un valor relativamente constante, pues la composición química del crudo tiene que ser suficientemente fija para asegurar que el clínker que se produce reúne las características exigidas. Este tanto por ciento se consigue, como ya se ha explicado anteriormente, con la mezcla de las materias primas, y aunque no se puede asegurar que sea exactamente constante, sí que se puede definir un valor medio que no varía significativamente:

Contenido de carbonato de calcio en el crudo: 78% CaCO₃

Reacción química de la descarbonatación de la caliza, que se produce liberando CO₂:



$$\begin{aligned}
 & 1t \text{ cemento} \times \frac{0,965 - 0,97t \text{ clinker}}{1t \text{ cemento}} \times \frac{1,5 - 1,6t \text{ crudo}}{1t \text{ clinker}} \times \frac{0,78t \text{ CaCO}_3}{1t \text{ crudo}} \times \frac{1mol \text{ CaCO}_3}{100g \text{ CaCO}_3} \times \\
 & \times \frac{1mol \text{ CO}_2}{1mol \text{ CaCO}_3} \times \frac{44g \text{ CO}_2}{1mol \text{ CO}_2} = \mathbf{0,497-0,533} \frac{t \text{ CO}_2}{t \text{ cemento}}
 \end{aligned}$$

Las emisiones significativas debidas a las reacciones químicas producidas dentro del horno de clínker se muestran en la tabla 6.18.

	CO ₂ (total)	CO ₂ (descarbonatación)	NO _x	SO ₂	Polvo
Concentración (g/Nm ³ gases)	463	264	0,342	7,4E-5	0,024
Emisión (g/t cemento)	898766	514714	665	1,45	46,9

Tabla 6.18 - Emisiones debidas a las reacciones químicas dentro del horno

Comentario sobre las emisiones del CO₂ en la primera columna se da su valor total y en la segunda, la parte del total que corresponde a la descarbonatación. Los resultados se comentan

detalladamente en el apartado 6.3 a partir de la comparación con el resto de inventarios de cemento portland.

6.4.3.2 - Residuos

Los residuos sólidos generados son básicamente los sacos de papel del cemento que se tiran una vez se ha utilizado el cemento, la madera de los palets que se estropean y tienen que ser repostados o arreglados y el plástico de las bolsas que embalan el conjunto de sacos apilados en cada palet.

Por lo tanto, la cantidad de residuos se considera igual a la cantidad de este material necesario por tonelada de cemento (véase tabla 6.19).

Recurso auxiliar	Kg/t cemento
Papel	2.59
Madera	6
Plástico	1.05

Tabla 6.19 - Residuos sólidos generados en la fabricación de 1 t de cemento

6.4.4 - Análisis de los resultados

6.4.4.1 - Consumos energéticos

Resultados totales

A continuación se exponen los valores resultantes obtenidos de la suma de todas las partes detalladas en los apartados anteriores, en las tablas correspondientes.

CONSUMO	MJ / t CEMENTO	
Energía eléctrica de las máquinas	máx	450,3
	mín	388,9

Tabla 6.20 - Consumo total de energía eléctrica de los equipos empleados, en MJ/t cemento.

CONSUMO	l gasóleo / t CEMENTO		MJ / t CEMENTO
Gasóleo de la maquinaria de las canteras y de los camiones de transporte	máx	2,51	96,8
	mín	1,42	54,7

Tabla 6.21 - Consumo total de energía fósil de la maquinaria de las canteras y de los camiones que hacen el transporte, en l gasóleo /t cemento y en MJ/t cemento.

CONSUMO	MJ/t CEMENTO	
Combustible del horno (coque+hulla)	máx	3.347
	mín	3.332

Tabla 6.22 - Consumo total de energía del quemador del horno, en MJ/t cemento.

Finalmente, en la tabla 6.23 se presenta la suma total de las tres fuentes de energía que intervienen en la fabricación del cemento: la energía eléctrica, la energía fósil en forma de gasóleo y la energía térmica del quemador del horno

CONSUMO	MJ / t CEMENTO	
TOTAL	máx	3895
	mín	3775

Tabla 6.23 - Consumo total de energía, en MJ/t cemento.

A partir de las tablas 6.20, 6.21 y 6.23 se ha configurado el gráfico 6.12, donde se ve claramente que el principal consumo de energía se da en el quemador del horno. Se trata de la energía térmica consumida en forma de combustible fósil mezcla de coque y hulla. Como se verá más adelante, es en este punto del sistema donde también se libera la principal cantidad de emisiones. El gráfico 6.13 muestra los mismos datos en tanto por ciento del total.

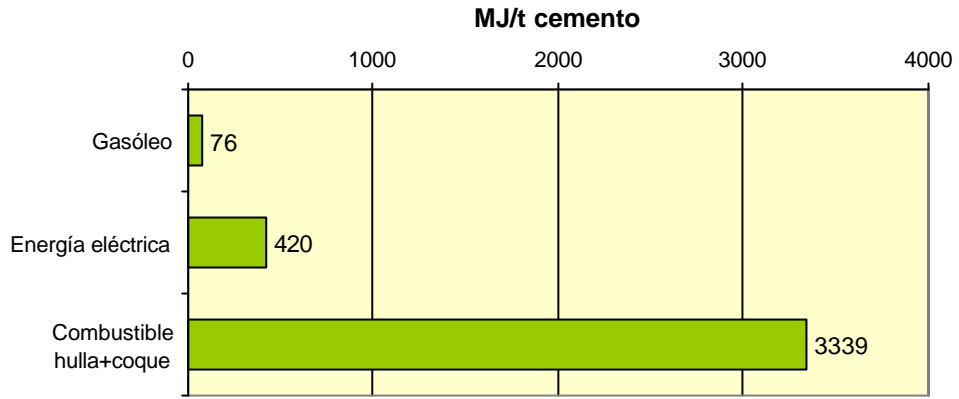


Gráfico 6.12 - Consumo de energía según las fuentes.

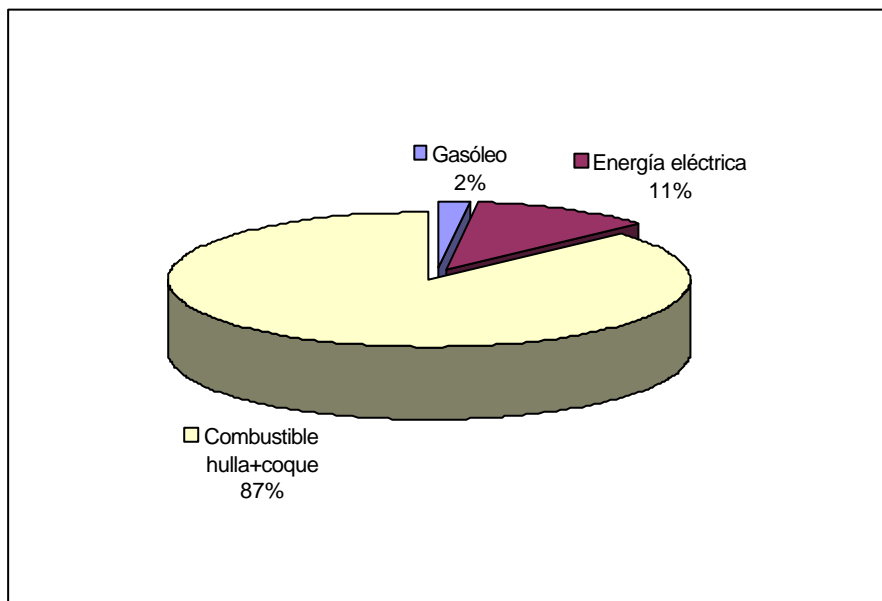


Gráfico 6.13 - Consumo de energía en tanto por ciento, según las fuentes.

Validación interna de resultados

Una vez se tienen los datos de consumo eléctrico de la maquinaria (tabla 6.13) debe hacerse una validación de los mismos. Es necesario hacer esta validación, porque los datos suministrados de la maquinaria que funciona con energía eléctrica responden al consumo teórico y hay que comprobar que se corresponda al consumo real.

Primero, es necesario tener presente que los datos de la maquinaria que se aportan son: por una parte la potencia, en kw, del motor de cada una; y por otra la producción en toneladas/hora de las mismas. Es a partir de estos datos, y como ya queda explicado en el apartado 6.4.2.2, que se obtienen finalmente los consumos en MJ/t cemento portland.

- Consumo medio: $\frac{1}{2} \times (450+389) = 420$ MJ/t cemento portland.

Para validar estos datos se comparan con el consumo eléctrico real de toda la fábrica, es decir, el consumo total que registra el contador de la compañía suministradora. Valor que se divide por la producción total de cemento portland, obteniendo finalmente el consumo en MJ/t cemento portland real.

- Consumo eléctrico total registrado en un año: 141.531.835 kwh
- Producción cemento portland en un año: 1.070.448 t cemento portland

$$C/P = 137 \text{ kwh/tn Portland} = 493 \text{ MJ/t Portland.}$$

Consumo eléctrico	MJ/t Portland
Teórico	420
Real	493

Tabla 6.24 - Comparación de consumo de electricidad teórico vs real

Nos encontramos con que el consumo total real es mayor que el consumo que se denominará teórico (tabla 6.24). Pero sobre estos resultados es preciso hacer una serie de comentarios:

Comentarios

- Como ya se ha dicho, el consumo real corresponde al valor que marca el contador principal del suministro eléctrico. Este contador mide toda la energía que consume la fábrica y, por lo tanto, también cuenta el consumo de las instalaciones suplementarias a las de la línea de producción estudiada. Es decir, que incluye, además, la electricidad consumida por el edificio administrativo y por los servicios generales de fábrica (que representan un 2% de los kwh totales). Descontando este 2%, el resultado queda:
- Consumo eléctrico total registrado en un año (-2%): 138.712.383 kwh
- Producción cemento portland en un año: 1.070.448 t Portland

$$C'/P = 130 \text{ kwh/t Portland} = 468 \text{ MJ/t Portland.}$$

Consumo eléctrico	MJ/t Portland
Teórico	420
Real (-2%)	468

Tabla 6.25 - Comparación de consumo electricidad teórico vs real, corregida

Observación: La fábrica en estudio, cuenta con dos líneas de producción de clinker, una de las cuales la principal, cuenta, además, con dos hornos en lugar de uno. Para hacer el ACV en esta campaña se ha seguido la línea principal, obteniendo los valores ya expuestos. Por contra, el contador principal del suministro eléctrico incluye, lógicamente, todas las líneas, pero en el momento de comparar resultados como se está haciendo (teóricos y reales), este factor no distorsiona los resultados ya que si bien el *consumo eléctrico total registrado en un año* incluye a las otras líneas, también dentro de la *producción de Cemento Portland en un año* están incluidas las toneladas de cemento producidas por estas otras líneas.

El consumo eléctrico real es más alto que el consumo teórico calculado por secciones. Esto se debe a que como se trata de un estudio no exhaustivo, hay ciertas máquinas o servicios que no se han tenido en cuenta en el cálculo teórico, como pueden ser máquinas auxiliares para cuando se estropean las de uso habitual, o sistemas de ventilación o de suministro de agua de refrigeración. También quedan imputados en el contador los consumos eléctricos de las máquinas utilizadas durante las posibles reparaciones y el mantenimiento.

Debido a todas estas consideraciones, se concluye que la diferencia entre los valores teóricos y reales representan un margen de error aceptable y, por tanto, los valores con los que se trabaja son válidos.

6.4.4.2 - Emisiones al medio ambiente

En la tabla 6.26 se encuentran los valores medios de las emisiones producidas durante todo el proceso estudiado de fabricación del cemento, separados según las fuentes de emisión así como el valor total suma de los anteriores. A partir de esta última tabla se puede confeccionar el gráfico 6.14 donde se aprecian, sobre una base del 100% de cada compuesto, en qué tanto por ciento deben su origen a cada una de las tres fuentes.

Finalmente, en los gráficos 6.15 y 6.16 se muestran los valores de dióxido de carbono, que es el principal gas contaminante debido a las grandes cantidades que se emiten, según la fuente de origen. En el primero, según las fases principales en que queda dividido el proceso de fabricación del cemento (véase figura 6.2), y en el segundo según las fuentes de energía

Es evidente que el foco principal que causa la liberación de este gas CO₂ es el horno del clinker. Nuevamente, pues, así como pasa también con el consumo energético, el punto determinante del proceso de fabricación de cemento en lo que respecta a las emisiones es el horno, y por tanto, el porcentaje de clinker que contenga un determinado cemento será la llave para conocer en qué grado se consume energía o se liberan compuestos por tonelada de cemento.

Todos estos resultados se comentan en el siguiente apartado 6.3 Interpretación de los resultados.

Emisiones por t cemento	Gasóleo	Electricidad	Total reacciones dentro horno	Total
g CO ₂	7131	61681	898767	967579
g NO _x	110	137	665	913
g SO ₂	10,6	323	1,45	335
g C _x H _y	22,5	0,846	-	23,3
g VOC	0	27,9	-	27,9
g Polvo	0,71	89,8	46,9	137
g Hollín	8,97	0	-	8,97
mg metales	2,09	3776	-	3777,65
mg Cd	0,16	3	-	3,30
mg Pb	5,13	209	-	214

Tabla 6.26 - Emisiones totales y según las fuentes, por tonelada de cemento.

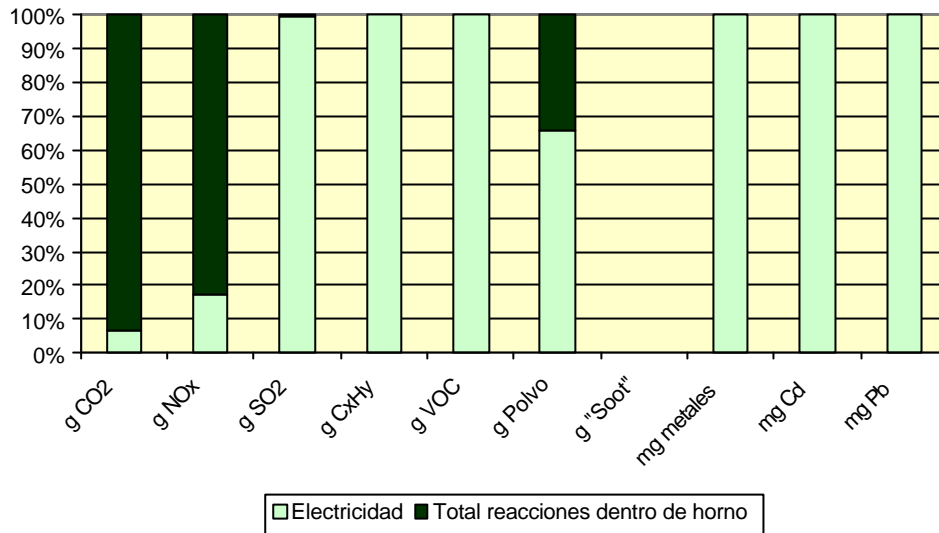


Gráfico 6.14 - Fuentes origen de las emisiones.

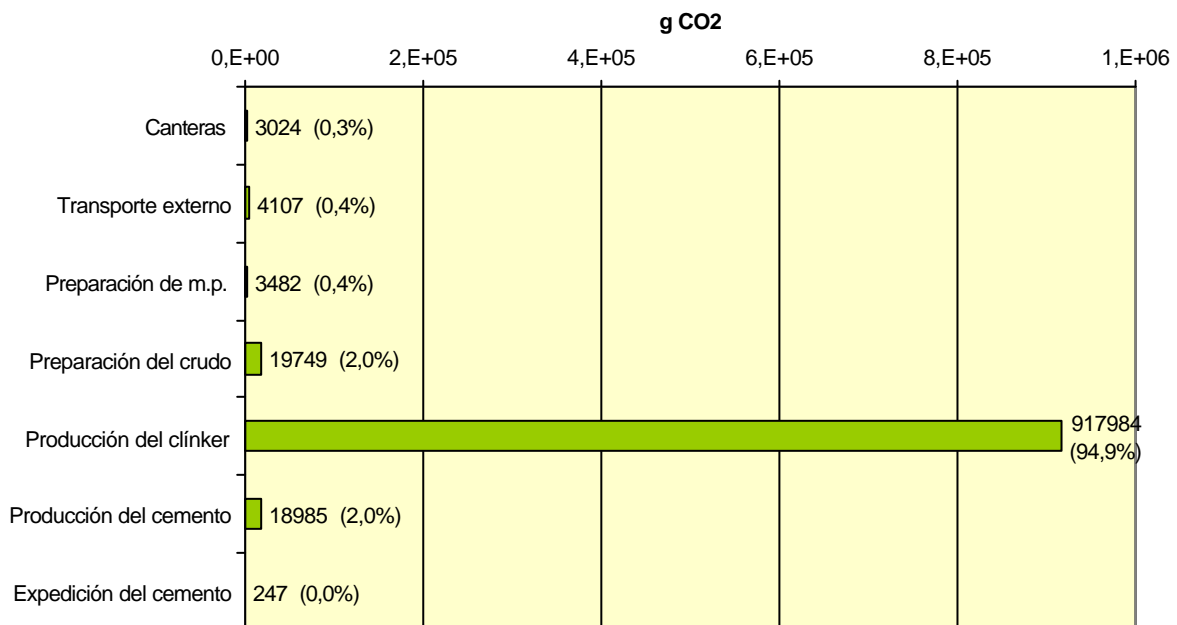


Gráfico 6.15 - Emisiones de CO₂ de cada paso del proceso de fabricación.

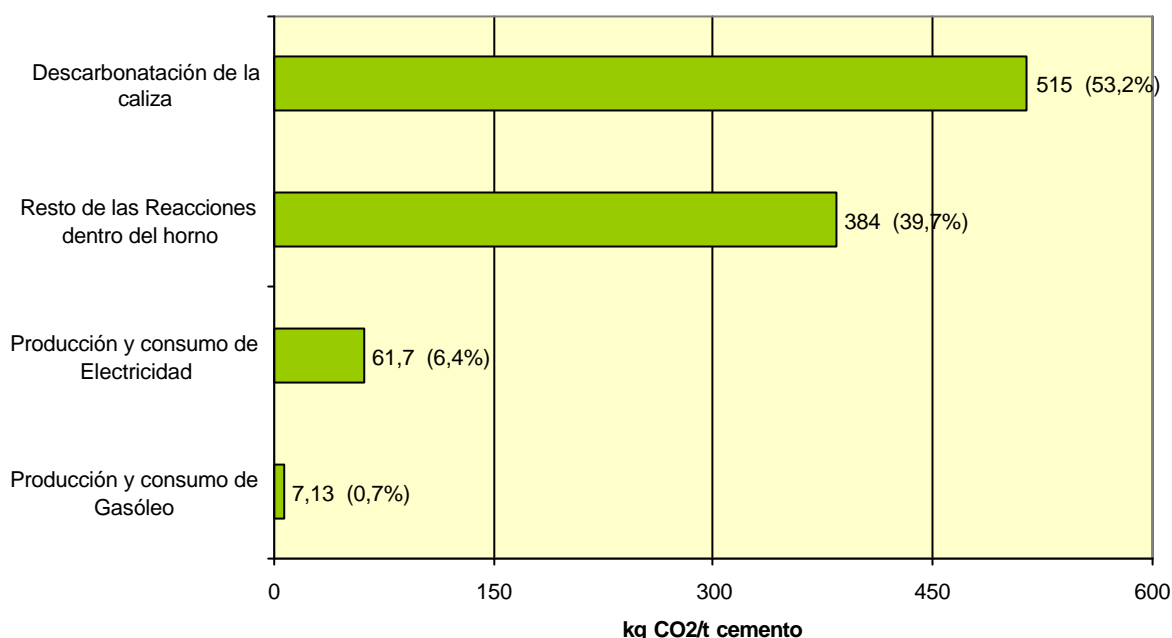


Gráfico 6.16 - Fuentes origen de las emisiones de CO₂.

6.5 - INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

6.5.1 - Introducción

La comparación entre los resultados obtenidos en los diferentes estudios existentes en el SimaPro 4.0 y, particularmente, con los resultados de esta campaña son un apartado fundamental para verificar su fiabilidad.

En este apartado se pretende comparar y analizar los resultados de los estudios de cemento Portland, esto es, de tipo I, ya que éste es el tipo de cemento estudiado en la campaña y sirve como patrón para el resto de cementos.

Este es un factor muy importante en el momento de estudiar el inventario, porque, como se verá más adelante, de todo el proceso de fabricación del cemento, la clinkerización es la fase clave; es la fase en la que se produce un consumo energético mayor y en la que tienen lugar las emisiones principales del proceso. Así, el porcentaje de clinker que contiene el cemento pasa a ser el factor decisivo en lo que respecta a su impacto ambiental. De aquí que los resultados

obtenidos por un cemento tipo I con un 95% de clinker y los de un cemento tipo III/B con un 30% de clinker puedan tener una variación del 70%.

Aunque los informes que se comparan son los de cemento Portland, es preciso tener en cuenta que la comparación no puede ser completa por diversos motivos:

- Los límites del sistema estudiado: si bien es cierto que los límites del sistema estudiado en la campaña quedan claramente definidos, los límites de los otros estudios de que se dispone no están tan claros. Concretamente, en lo que respecta a los informes aportados por PRé Consultants, no se dispone de ninguna representación gráfica de las etapas que corresponden al sistema estudiado (producción de 1 kg de cemento) que ayude a concretar las fases descritas; mientras que en lo que respecta a los informes aportados por el Cembureau, aunque sí que disponemos de una representación, existe una notable diferencia entre los sistemas evaluados. Los diagramas de flujo que esquematizan los sistemas estudiados se encuentran en el anexo 4.
- Las características propias de los procesos utilizados en el sistema estudiado: se hace referencia a las diferentes alternativas disponibles entre la maquinaria capaz de desarrollar una determinada labor o incluso en la necesidad de seguir procesos diferentes en algunas fases según el tipo de materia prima de la que se disponga, como puedan ser las fases de prehomogeneización y de homogeneización, por ejemplo.
- Los países donde se fabrica el cemento evaluado: como ya se ha comentado previamente, todos los informes de los que se dispone corresponden a fábricas de cemento de países del centro y norte de Europa, lo cual afecta directamente a los resultados de las emisiones al medio. Esto es debido a la generación de la energía eléctrica, puesto que en los diferentes países responde a diferentes orígenes (nuclear, hidroeléctrica, de centrales térmicas, solar, eólica, de mareas, etc.) en diferentes porcentajes. Por lo tanto, las emisiones en la obtención de una misma cantidad de energía eléctrica serán diferentes. Las matrices energéticas de cada país donde se especifican las características de la energía consumida se encuentran, así mismo, en el anexo 3.
- Incidiendo también en el valor de las emisiones, sería necesario conocer las características del combustible fósil que se utiliza en el quemador del horno, así como los sistemas de depuración de los que se dispone.

6.5.2 - Estudio comparativo

El estudio comparativo se realizará, pues, entre 7 inventarios (de los cuales el primero – Cement Portland I- pertenece al grupo de los inventarios aportados por PRé Consultants y los seis restantes al grupo de los aportados por el Cembureau); los datos aportados por un informe del Cembureau publicado en 1995 en la revista World Cement [Bannon, 1995] (tan sólo para comparar resultados energéticos, no sobre emisiones); y el inventario confeccionado en esta campaña a partir del estudio de una planta española. Estos informes quedan recogidos en la tabla 6.27, en la que se especifica el país al que corresponden los resultados. Es importante advertir que los inventarios de que se dispone no son una completa representación de las fábricas de cemento existentes en Europa, ya que los países representados producen tan sólo menos del 17% del total del cemento producido en Europa [Cardim, et al., 2000].

Nomenclatura	País
Cement Portland I	Holanda (1993)
Cement CH	Suiza (1994)
Cement N	Suecia (1995)
Cement NL1	Holanda (1993)
Cement S	Suecia (1995)
Cement SF1	Finlandia (1995)
Cement SF2	Países Nórdicos ² (1995)
Inf. Cembureau	Media europea (1995)
Consumo Ideal [26]	Europa (1995)
Campaña	España (2000)

Tabla 6.27 – Cementos seleccionados para los estudios comparativos

Como se puede observar en el anejo 2, en los sistema considerado en los diferentes inventarios, tan sólo los cementos Cement S y Cement SF2 tienen definido un sistema completo básicamente análogo al de la campaña, aunque se desconoce con exactitud la maquinaria que se ha tenido en cuenta (filtros, cintas, etc.). El inventario del cemento Cement SF1 parece que también considera el sistema desde el inicio de la obtención de las materias primas, pero en él faltan fases como la trituración de las materias primas o su prehomogeneización, de manera que no aclara si se han tenido en cuenta. Finalmente, los datos de los demás cemento son claramente insuficientes ya que no aportan ninguna información.

² Finlandia, Suecia y Noruega

6.5.2.1- Consumo energético

El consumo energético durante la fabricación del cemento es básicamente de tres tipos:

- El consumo de la maquinaria que explota las canteras para obtener la materia prima y, si se da el caso, el consumo de los camiones que hacen el transporte externo hasta la fábrica –consumo de gasóleo o diesel-.
- El consumo de la maquinaria utilizada durante todo el proceso de transformación que consume electricidad.
- El consumo del quemador del horno de clinker que puede funcionar con diferentes tipos de combustible, generalmente se utilizan combustibles fósiles no renovables como carbón (en el caso en estudio), el diesel de combustión o el gas natural.

En el conjunto de inventarios de los que se dispone, la energía consumida se divide en *energía eléctrica* y *energía térmica*. La energía eléctrica responde al funcionamiento de la maquinaria. La térmica responde, en principio, a la consumida por el quemador del horno; aunque parece que en los inventarios que consideran la fase de extracción del material de las canteras, ésta incluye también el gasóleo de las máquinas utilizadas.

	Energía Eléctrica MJ/t cemento	Energía Térmica MJ/t cemento	Energía Total MJ/t cemento
Cement Portland I	318	4226	4544
Cement CH	557	2980	3537
Cement N	557	3850	4407
Cement NL1	318	3380	3698
Cement S	470	4070	4540
Cement SF1	450	4900	5350
Cement SF2	325	3799	4124
Inf. Cembureau 1995 ³	400	3680	4080
Consumo Ideal	360	3240	3600
Campaña⁴	420	3416	3836

Tabla 6.28 - Consumo energético en la fabricación de 1 tonelada de cemento

³ Media de un estudio realizado en 1995 entre diferentes fábricas cementeras de Europa

En la tabla 6.28 se presentan los diferentes consumos de energía eléctrica y térmica, así como el total, de cada inventario, de los informes del Cembureau y de la campaña. El consumo de energía térmica de la campaña incluye también el del gasóleo (con una proporción de 98% carbón del horno y 2% gasóleo). A partir de esta tabla se obtiene el gráfico 6.17.

Energía eléctrica

Se puede observar que el consumo de energía eléctrica del caso en estudio está un 5% por encima de lo que sería la media europea según el informe del Cembureau y un 17% por encima del consumo ideal; mientras que se mantiene un 2% por debajo de la media del resto de inventarios.

Esta variación se debe, parcialmente, a los límites del sistema considerados. El desconocimiento de los límites que consideran los estudios de los cementos Cement Portland I y Cement NL1 impide encontrar la razón del porqué son consumos sensiblemente menores, y hace pensar que la causa sea la no computación de alguna de las fases de fabricación. Otra causa de los diferentes consumos es la maquinaria utilizada, ya que para realizar un mismo proceso, existe una gama amplia según el caso. Por ejemplo, determinados transportes se pueden hacer con un camión o con una cinta transportadora (que consume electricidad); o el enfriamiento del clinker, que se puede hacer con refrigeradores de parrillas que consumen más electricidad que los refrigeradores planetarios. Finalmente, también cabe considerar la eficacia de la maquinaria utilizada.

En cualquier caso, el consumo de energía eléctrica de la fábrica en estudio representa un 11% de su consumo total, cifra que no se aleja del 10% que representa, como media, del resto de estudios.

Energía Térmica

El consumo de energía térmica del caso en estudio está un 7% por debajo de lo que sería la media europea según el Informe del Cembureau, pero un 5% por sobre del consumo ideal según el mismo organismo. Por otra parte, la media del resto de inventarios es de 3886 MJ/t cemento, con una desviación de 569, por tanto, el caso en estudio se encuentra un 12% por debajo de esta media.

De aquí se deduce que el consumo en esta planta es equiparable al resto de plantas europeas. La variación se debe a la eficiencia del combustible que se utiliza en el quemador. Aquí entran también en juego otras cuestiones como pueden ser las características del crudo que se somete al proceso de clinkerización o aspectos técnicos como la tipología de horno (si cuenta con la línea de gases secundaria para aprovechar el calor, el grado de estanqueidad, etc.). El

hecho que el valor sea sensiblemente inferior a la media del resto de inventarios puede ser debido a las mejoras técnicas de los últimos años, ya que son inventarios confeccionados hace unos 5 años o más.

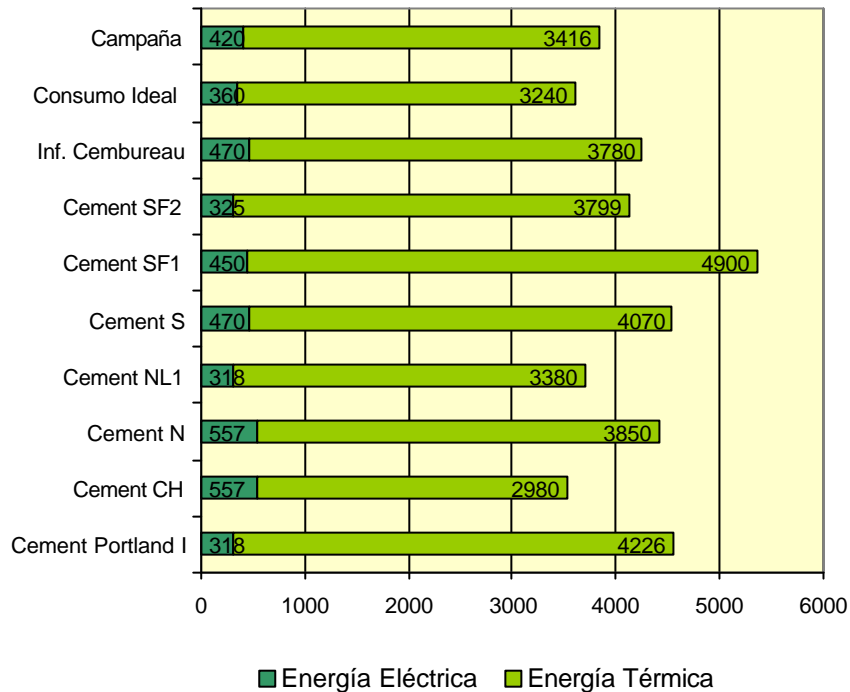


Gráfico 6.17 - Consumos energéticos en la fabricación de 1 tonelada de cemento

Energía Total

Finalmente, las variaciones entre los diferentes valores de consumo total de energía se deben básicamente a las mismas causas expuestas en los subapartados anteriores y, principalmente, en lo que respecta al consumo de energía térmica ya que ésta representa en media un 89% del consumo total.

El consumo total de energía del caso en estudio sigue estando por debajo de la media europea, un 6%; por encima del consumo ideal, un 7%; y por debajo de la media del resto de inventarios evaluados un 11%.

Es necesario destacar que la diferencia entre la media europea definida por el Cembureau y la media resultante de los inventarios disponibles (4080 vs. 4314 MJ/t cemento respectivamente) difieran sensiblemente debido a que como ya se ha comentado previamente, los países representados con estos inventarios sólo producen una pequeña parte del cemento en Europa.

6.5.2.2 - Emisiones al medio ambiente

La tabla 6.29 muestra los valores disponibles de las emisiones de los inventarios estudiados y de la campaña.

Previo a lo que sería la comparación individualizada de cada compuesto, se evalúa la diferencia entre las matrices energéticas de cada país. Como ya se ha comentado en un apartado anterior, el conjunto de emisiones debidas al consumo eléctrico de la fábrica se ha obtenido a partir de la base de datos del SimaPro que contiene las emisiones producidas al generar y consumir 1MJ en España. Igualmente, la misma base contiene estos datos para el resto de países europeos, y por tanto, se puede hacer un estudio comparativo.

(Kg/t cem)	Cemento Portland I	Cemento CH	Cemento N	Cemento NL1	Cemento S	Cemento SF1	Cemento SF2	Campaña
CO2	355	810	813	853	805	780	813	968
NOx	0.96	2.00	2.09	2.58	1.94	3.70	2.95	0.91
SO2	0.43	0.60	0.67	0.09	0.45	0.63	1.33	0.34
CxHy	0.04	-	0.05	-	0.02	0.13	0.10	0.02
VOC	-	-	0.13	0.003	0.13	0.91	-	0.03
Polvo	10.0	0.30	0.18	7.50	0.16	0.39	0.66	0.14
Hollín	0.01	-	-	-	-	-	-	0.01
Metales	3.6E-6	-	-	-	-	-	-	3.8E-3
Cd	1.1E-7	7.5E-5	1.0E-5	-	1.0E-5	2.0E-6	6.9E-6	3.3E-6
Pb	2.1E-7	2.2E-4	8.7E-6	-	8.7E-6	4.9E-7	1.5E-5	2.1E-4

Tabla 6.29 - Principales emisiones durante la fabricación de 1 tonelada de cemento

En el capítulo 3 se encuentra un conjunto de datos para los países en estudio (véase tabla 3.7). Comparando los datos para los diferentes países se observa que los que más contaminan por MJ de energía producida y consumida son, en un primer nivel: Holanda, Finlandia y Austria; seguidos de Suiza y Suecia y finalmente, con un nivel de contaminación muy menor, Noruega. Esto se debe a las fuentes principales que utilizan para producir la energía eléctrica, que son, respectivamente: gas y carbón (Holanda); uranio, saltos hidráulicos y carbón (Finlandia); saltos hidráulicos y carbón (Austria); uranio y saltos hidráulicos (Suiza); saltos hidráulicos y uranio (Suecia); y saltos hidráulicos (Noruega).

Desgraciadamente, las interpretaciones que se puedan hacer a partir de esta información son demasiado subjetivas, ya que los inventarios de los que disponemos no aportan los valores de emisión separados por fuentes, como se tiene en el caso de estudio.

Finalmente, es necesario tener en cuenta que en los gases afectados por la combustión del combustible del horno del clinker, la cantidad de emisión depende del tipo de combustible, del

tipo de combustión (temperatura, exceso de aire, etc.) y de los sistemas de depuración de gases adoptados.

Dióxido de carbono CO₂

Las emisiones de CO₂ de los inventarios se deben a las causas siguientes:

- Energía eléctrica consumida durante todo el proceso
- Combustión del combustible del horno
- Descarbonatación de la caliza dentro del horno durante la clinkerización

Por lo tanto, y a diferencia del inventario de la campaña, no se considera la fuente de emisión que representa el consumo del combustible utilizado en las canteras (gasóleo de la maquinaria) ni por el transporte de las materias de las canteras o puntos de suministro a la fábrica (gasóleo de los camiones). Esta simplificación como se ve en el gráfico 6.15 representa un 0,7% de la emisión total de CO₂, con lo que las emisiones del caso en estudio quedarían en: 968 – 7% = 900 kg CO₂/t cemento portland.

Aun con esta rectificación, el valor que se obtiene, 900, continúa siendo sensiblemente más alto que el resto que tienen valores en torno a 810 (media 812 kg CO₂/t cem.); salvando el valor del cemento llamado Cement Portland I que es claramente inferior al resto, seguramente debido a un error numérico o a que los límites del sistema están mal definidos. En parte puede ser debido a que en España se encuentra entre los países que más CO₂ emiten por megajoule de energía eléctrica, como se ha comentado con anterioridad (véase tabla A4.1).

Pero la razón principal se ha de buscar en las reacciones químicas dentro del horno de clinker, ya que es aquí donde se producen el 93% de las emisiones de este gas (véase gráfico 6.16). Para el caso en estudio, esta información se ha obtenido de un modelo químico proporcionado por los técnicos de la fábrica, no de una medición real como en otros gases. Hará falta, pues, conocer como se ha calculado en los otros inventarios. No obstante, es determinante el hecho que el cemento portland tomado como una unidad en la campaña no contenga adiciones y por lo tanto, está formado por un 100% de clinker si no se tiene en cuenta el yeso; mientras que el resto de cementos considerados por los otros inventarios tienen hasta un 5% de adiciones, lo cual disminuye el contenido de clinker y, en consecuencia, disminuye directamente la cantidad de CO₂ emitida. También puede resultar relevante el hecho que el crudo que entra en el horno tenga un porcentaje elevado de carbonato de calcio (78% CaCO₃).

Óxidos de nitrógeno NO_x

Las emisiones de dióxido de nitrógeno engloban las de NO y NO₂ y se deben a las causas siguientes:

- Energía consumida durante todo el proceso
- Combustión del combustible del horno

Contrariamente a lo que sucede con el dióxido de carbono, en este caso no se producen emisiones de NO_x debido a reacciones químicas del clinker.

El valor obtenido en el caso en estudio 0,91 kg NO_x/t cemento es claramente inferior al resto de los inventarios, excepto el del Cement Portland I que es de 0,96. La causa parece ser que la cantidad emitida de este gas debido la combustión es baja, según se desprende del informe *análisis del ciclo de vida de la producción de cemento* [Cardim, et al., 2000b].

En este informe se hace un cálculo teórico de lo que deberían ser las emisiones de NO_x en los diferentes inventarios según un modelo existente. Aplicando este modelo a todos los inventarios en estudio se obtiene un valor medio de emisión debido a la energía eléctrica de 100g NO_x/t cemento y un valor medio de emisión debido a la combustión de los combustibles fósiles del horno de 2100g NO_x/t cemento. Comparando estos valores con los obtenidos en el caso en estudio: 100 vs. 137 y 2100 vs. 665 respectivamente (véase tabla 6.26) parece claro que el problema se encuentra en los gases liberados de la combustión en el horno.

Como resultado se obtiene una media de emisión debida al consumo de energía eléctrica en torno a los 100 g NO_x/t cemento (ante los 137g del caso en estudio – ver tabla 6.26), y una media de emisión debida a la combustión de los combustibles fósiles en torno a los 2100 g NO_x/t cemento (ante los 665g del caso en estudio, véase tabla 6.26).

Observando el dato en lo que respecta a las densidades de emisión, se liberan 342 mg/Nm³ de gases emitidos (véase tabla 6.18). Este valor, aun siendo bajo, se aproxima al rango de valores medios de las emisiones de los hornos europeos (véase tabla 4.30) según el Cembureau, 1999 [29].

Emisión	Concentración (mg/Nm ³)
Partículas	20-200
NO _x	500-2000
SO ₂	10-2500

Tabla 6.30 - Valores medios de las emisiones de los hornos de cemento europeos

Dióxido de azufre SO₂

Las emisiones de dióxido de azufre se deben a las causas siguientes:

- Energía consumida durante todo el proceso
- Combustión del combustible del horno
- Reacciones químicas que se producen dentro del horno a partir del azufre que contiene el crudo (básicamente procedente de la arcilla)

Observando la tabla 6.29, se concluye que los valores de dióxido de azufre son difíciles de comparar porque varían bastante, aunque la mayoría se mantiene en torno de los 0,4 - 0,6 kg de SO₂/t cemento portland, rango no muy alejado del 0,3 obtenido en el caso de estudio. No obstante, si se comparan los datos con los del informe [Cardim, et al., 2000b], se observa nuevamente que las emisiones de SO₂ medidas en la salida del horno son muy bajas (1,45 g SO₂/t cemento portland en el caso en estudio –véase tabla 4.18-, en contraposición a la media del susodicho informe: 300 g SO₂/t cemento portland).

En la fábrica en estudio, prácticamente todo el SO₂ procede del combustible y queda incorporado casi completamente al clinker, liberándose a la atmósfera cantidades muy bajas de este gas. Por otra parte, cuando se procede a medir concentraciones tan pequeñas aparece el problema de la fiabilidad del aparato de medida. A niveles de µg, estos aparatos pueden dar errores de diversos órdenes de magnitud. Por eso resulta una medida difícil de validar.

Resto de emisiones

En el resto de emisiones, como se trata de compuestos minoritarios, se hace más difícil pretender una equiparación de resultados entre los inventarios analizados.

Excepto con los hidrocarburos (que se mantienen en la mayoría de inventarios sobre los 0.02 y 0,05 kg C_xH_y/t cemento portland; inclusive el valor obtenido en el caso en estudio), el resto de compuestos presentan una dispersión considerable que puede ir de 1 a 3 órdenes de magnitud, e incluso, en algunos casos ni se recoge el dato. Esto da una idea de la poca representatividad de los mismos, unos porque dependen de cuestiones secundarias como el consumo de gasóleo y otros porque son cantidades irrelevantes.

La otra variación en los resultados de las emisiones de VOC, metales, cadmio y plomo, compuestos que se liberan principalmente durante la fabricación y consumo de energía eléctrica, tiene una de las causas en la diferente composición de la energía eléctrica de cada país, como se ha comentado anteriormente.

6.6 – CONCLUSIONES

De la campaña realizada para acotar los datos de entradas y salidas de la producción de cemento en un caso real de una fábrica en Cataluña, se extrae, las siguientes conclusiones:

- Evaluando el conjunto de estudios de ACV existentes en el campo del cemento y de sus derivados, se observa claramente que casi todos se han realizado en países del centro y del norte de Europa. Por lo tanto, faltan estudios principalmente en países del área mediterránea (p.ej.: España, Italia y Francia) donde se produce cerca del 50% del total del cemento fabricado en Europa.
- El principal recurso natural necesario para la fabricación de cemento portland es la caliza, y su explotación en régimen de cantera a cielo abierto, tiene una importante repercusión en ámbito local. Si por una parte aparece la alteración del paisaje y la ocupación de una superficie natural, por otra, está la contaminación por polvo, gases y ruidos, que repercute de forma negativa, principalmente, cuando existe algún núcleo habitado a cerca de la cantera.
- El consumo energético proviene de tres fuentes: el combustible (gasóleo) para las maquinarias (2%), la energía eléctrica suministrada por la red (11%) y el combustible fósil necesario para la quema de la materia prima en el horno (87%).
- La energía eléctrica sólo representa un 11% de la energía total, y se consume algo como, 420 MJ/t cemento portland. Este consumo, se reparte en todos los procesos de fabricación, resultando mucho más alto en las fases de trituración del crudo (consumo eléctrico del molino de crudo), cocción para transformar de crudo a clinker (la línea del horno) y la preparación del cemento (molino de cemento).
- Con respecto a las emisiones de gases a la atmósfera, confirmarse que las emisiones más altas son, las de dióxido carbónico CO₂, seguida en un plano más bajo por los óxidos de nitrógeno NO_x y dióxido de azufre SO₂.
- Las emisiones de CO₂ son muy altas, liberando a la atmósfera cerca de 970 kg. de CO₂/t cemento portland, lo cual representa, en el caso en estudio, más de 50.000 m³ CO₂/h en condiciones normales de presión y temperatura (1atm y 20° C). Del total de CO₂ liberado, el 53% proviene de la descarbonatación de la caliza dentro del horno; el 40%, de las reacciones producidas también en el horno por la combustión del carbón y solo el restante 7% proviene de la fabricación y consumo de la electricidad y del gasóleo.

- Mientras aún no exista una legislación que limite las emisiones del CO₂, en cambio de NO_x y SO₂, está lejos de ser superada la indicada en la legislación vigente de estas emisiones (342mg NO_x/Nm³ liberados en los gases del horno ante los 1.800 permitidos y 0,01mg SO₂/Nm³ ante los 6.000 permitidos, respectivamente).
- En el total de las emisiones de NO_x, el 12% corresponden al consumo de gasóleo, el 15% al consumo de energía eléctrica y el 73% a las reacciones producidas dentro del horno a causa de la combustión del carbón. Respecto al SO₂, el 3% corresponden al consumo de gasóleo, el 96,5% al consumo de energía eléctrica y sólo el 0,5% a las reacciones producidas dentro del horno principalmente a causa de la combustión del carbón.
- Por lo que respecta a las fases de fabricación del cemento, el horno de clinker es el punto de mayor repercusión en todo el proceso, por el hecho de que es donde se produce proporcionalmente el mayor consumo energético y la mayor parte de las emisiones. En el horno, durante este proceso que da lugar a transformación del material crudo en clinker, es responsable por el 87% del consumo energético de todo el proceso y el 95% de las emisiones del CO₂. Las otras fases más significativas son las del molido tanto del crudo como del cemento, que se llevan cada una el 30% del total del consumo eléctrico de la fábrica.
- Considerando que es en el horno donde están las mayores cargas ambientales del proceso de producción de cemento, no implica necesariamente que sea el único punto a tener en cuenta, es posible que en otras fases el proceso que no esté optimizado en cuanto al consumo de recursos y energía, también sea necesario emprender mejoras.
- Desde el punto de vista del consumo de combustibles, el uso de combustibles secundarios, que son los productos clasificados como residuos (neumáticos, caucho, plásticos, aceites y disolventes usados; etc.), sería ventaja utilizarlos ya que por una parte se eliminan estos residuos que en caso contrario deberían llevarse a una incineradora; y por otra, se produce un ahorro de combustibles fósiles no renovables. Por lo que respecta a los gases liberados, las emisiones de gases son relativamente similares en la quema de los dos combustibles, mientras que si se utilizan los combustibles fósiles tradicionales, las emisiones por la quema de los residuos se producen igualmente en las incineradoras, en cambio, con la quema de residuos se elimina una de las fuentes emisoras. Por lo tanto, hay que inventariar correctamente estos sistemas y valorar el uso de residuos.

- Para las fábricas cementeras quemar residuos puede representar un ahorro tanto económico como medioambiental, por cuanto se deja de consumir en combustibles fósiles. Además, puede suponer una salida a las restricciones de una posible ley que limite las emisiones de CO₂, ya que las emisiones producidas por la quema de residuos tendrían un tratamiento especial (por ejemplo, en forma de créditos de emisión equivalente), al tratarse de una solución con beneficio social.
- De la comparación con otros inventarios existentes se concluye que los valores obtenidos se encuentran dentro de la media de consumos y emisiones. Y dentro de esta regularidad, los consumos energéticos resultan ligeramente menores, así como las emisiones de NO_x y de SO₂, mientras que las emisiones de CO₂ son ligeramente más altas.
- El hecho de que los inventarios existentes estén confeccionados sin una metodología uniforme y no definan claramente el origen de los valores que presentan, dificulta explicar las posibles diferencias en los resultados de la campaña, con aquellos valores comparados que no difieren significativamente. Entre las causas que se apuntan para las diferencias están los límites de los sistemas considerados; Cuestiones de carácter técnico incluyendo la eficiencia o tipología de la maquinaria; y las características propias del crudo que afecta a la temperatura necesaria para su transformación en clinker.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

7.1 – INTRODUCCIÓN

En este capítulo, se expone las conclusiones resultantes de los trabajos de investigación llevados a cabo en la presente tesis doctoral. Estas conclusiones se dividen en conclusiones generales de un carácter transversal y amplio y, en conclusiones específicas, asociadas a los temas concretos tratados en los distintos capítulos.

Para finalizar, en este capítulo se aportan diferentes líneas de investigación que deberían servir para orientar futuros trabajos de investigación y aplicación que consolidasen el empleo de análisis del ciclo de vida, tanto en el ámbito de los materiales derivados del cemento como para otros productos de la construcción.

7.2 – CONCLUSIONES GENERALES

El amplio estudio bibliográfico realizado, refleja que existe una creciente tendencia de estudios de temas medioambientales con diferentes herramientas en aras a cuantificar las distintas variables. Ahora bien esa situación no es igual en los distintos sectores; así mientras está bastante avanzado en sectores industriales, especialmente en la industria química y en productos de relativamente corta vida útil, está, claramente más retrasado en el sector de la construcción donde la vida útil de una estructura, entendida como un producto, está en la

mayoría de casos no explicitada, aparte de que intervienen muchos más agentes productivos que en otros sectores. Así pues, el camino por recorrer en este ámbito es muy importante, sino se quiere consolidar la imagen del sector como depredadora del medio ambiente.

Como ya se ha apuntado, una de las posibles explicaciones de que los temas del ACV estén menos desarrollados en el sector de la construcción es la dificultad de la definición de los límites del sistema en el proceso constructivo, con una vida útil no definida y diferentes puntos de análisis. Por ello, en la presente tesis entendíamos necesario ahondar en esta dirección y, en consecuencia, se hacen unas aportaciones conceptuales, entendemos que significativas, en cuanto a la definición de esos límites, la diferenciación del nivel de análisis y los tratamientos de reciclados del sector de la construcción. Estas propuestas, aunque ajustadas al sector de la construcción son aplicables a otros sectores.

La metodología del análisis del ciclo de vida (ACV) exige como fase del proceso de clasificación, disponer de inventarios del ciclo de vida de todos los sistemas y subsistemas que estén incluidos entre los límites del sistema de la unidad funcional estudiada. Estos inventarios deben tener la representatividad necesaria, tanto en el ámbito temporal como geográfico, con objeto de que los resultados obtenidos sean fiables. Los estudios realizados en esta tesis muestran diversas dificultades en este campo de los inventarios disponibles en el ámbito internacional (CEMBUREAU y SimaPro), lo que un uso no riguroso de los mismos puede conducir a errores significativos, a favor o en contra, de los productos derivados en base cemento.

En el ámbito nacional no se disponen de datos públicos sobre inventarios de la producción del cemento, por lo que el uso de los inventarios internacionales señalados, aparte de las dificultades reflejadas, debe hacerse con cuidado de que las características sean similares. Sino son similares, consecuencia de que los recursos utilizados sean diferentes (principalmente, en lo que hace referencia los combustibles), su uso podría conducir a resultados no fiables. Todo ello pone de manifiesto la necesidad de avanzar en la elaboración de unos inventarios nacionales en los que se incorporase las características de cada fábrica y cemento.

Ahondando en esta dirección, la presente tesis presenta las bases para elaborar un inventario nacional, aplicándolo para un caso concreto con el fin de mostrar la metodología a seguir y las dificultades que se encuentra en su implantación. Asimismo, la propuesta realizada permite estructurar en subsistemas que faciliten el desglose e intercambio en otros inventarios que siendo diferentes en el sistema global, compartan subsistemas iguales. Entre las dificultades referidas se encuentra el papel fundamental que, al plantearse la obtención de los datos técnicos de una fábrica de cemento, adquiere la entrevista con las personas que estén al corriente de todo el proceso. Una inadecuada elección puede conducir a una gran dispersión y a la obtención de detalles irrelevantes y poco representativos del sistema o subsistema analizado

7.3 – CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

7.3.1 – Relativas al estudio de los inventarios disponibles del ciclo de vida del cemento

Tras el análisis riguroso y detallado de los datos de entradas y salidas de los inventarios disponibles del sistema de producción de cemento realizados en los capítulos 3 y 4, se desprende, las siguientes conclusiones:

- Los límites de los sistemas de los diferentes cementos existentes en los inventarios no son homogéneos y, en algunos casos, mal definidos lo cual dificulta, lógicamente, los análisis posteriores. En general, se definen límites del sistema que atienden a condiciones específicas de un estudio, consecuentemente, estos límites no contienen la representatividad (temporal y/o geográfica) adecuada para aplicarlos en estudios cuyos objetivos difieren de aquellos inicialmente propuestos y que motivaron su elaboración.
- Existen modelos teóricos, que basándose en resultados medios, pueden acotar las sustancias emitidas durante la fabricación del cemento y servir como referencia a los valores medidos y, en algunos casos, ser una alternativa razonable de minimización de campañas de medidas de campo, dado que estas son costosas y pueden requerir elevado período de tiempo.
- Las emisiones de gases que causan impactos al medio ambiente se producen principalmente en la fabricación del clinker, tanto por las reacciones químicas que originan la descarbonatación de la caliza, como por la quema de los combustibles fósiles. Por lo tanto, es determinante acotar las emisiones generadas en el subsistema de producción de clinker, una vez que el perfil medio ambiental del cemento dependerá fundamentalmente de su contenido de clinker. La presencia de adiciones de características cementantes (cenizas, escorias, puzolanas naturales, etc.) puede representar significativos cambios en el tipo de cemento y, por lo tanto, en sus aspectos medioambientales.

7.3.2 – Relativas a caracterización de los impactos medioambientales de la producción de cemento, realizadas con los inventarios disponibles

La caracterización de los impactos ambientales originados en la fabricación de 1 kilogramo de cemento de distintos tipos, realizada de acuerdo con la metodología del ACV, permite extraer las siguientes conclusiones:

- La caracterización ha puesto de manifiesto, nuevamente, los errores e indefiniciones de los límites del sistema o subsistemas ya evidenciados en las conclusiones anteriores. Ello es lógico ya que la caracterización es una fase posterior de las entradas al sistema y las salidas del mismo, reflejadas en las emisiones. Ello incide en la necesidad de crear un inventario bien definido, en el que los límites del sistema y subsistemas estén bien estructurados

- La contribución del dióxido de carbono (CO_2) en el efecto invernadero se sitúa entre el 98,8% y el 100% del total, es decir, es el principal causante del mismo. La influencia de otros gases (metano, CH_4 , óxido nitroso, N_2O), es mucho más pequeña. Por otro lado, las emisiones de CO_2 son cuantitativamente importantes y se sitúan, por ejemplo, en el orden de los 800 gramos de CO_2 emitidos en la producción de 1 kg de cemento del tipo I. Esta cifra disminuye a medida que la cantidad de clinker disminuye en el cemento (Otros tipos de cemento).

- La acidificación la produce, fundamentalmente, las emisiones de SO_2 y NO_x . El total (en gramos de SO_2 equivalente) depende del tipo de cemento (contenido de clinker) situándose entre 2 y 3 gramos por kilogramo de cemento para los cementos de tipo I, entre 1 y 2 para los cementos tipo II y con valores inferiores a 1 para los cementos tipo III y IV. Las emisiones de NO_x son las que más contribuyen a la acidificación, mientras que las de HCl y NH_3 producen un efecto prácticamente despreciable.

- La fuente principal en el caso de la eutrofización está en las emisiones de NO_x , pudiéndose considerar como despreciables en la caracterización de este impacto medioambiental, el resto de las emisiones consideradas. Para cementos tipo I se obtienen del orden de 250 a 350 miligramos de PO_4 equivalentes por kilogramo de cemento, mientras que para los cemento tipo II, este entorno se sitúa entre 125 y 250, y para los cemento tipo III, entre 50 y 125. Estos resultados vienen a representar que una planta de cemento que produzca 1 millón de toneladas al año, aporta una carga de fósforo del orden de 0,5 kilogramos por hectárea (considerando un área de influencia de 4.000 km^2).

- En el caso de la contaminación de invierno (partículas pequeñas de polvo en suspensión en el aire), los principales contribuyentes son el SO_2 , el polvo y el hollín. Los resultados muestran, por un lado, que la significación de las emisiones de hollín es despreciable y, por otro lado, que existe una gran disparidad de la influencia de SO_2 y polvo (en porcentaje).

- En los casos de la formación fotoquímica de ozono (contaminación de verano), los metales pesados y los carcinógenos, los resultados son muy variables dependiendo de los combustibles y materias primas empleados. Cabe indicar que, en muchos de estos casos, las emisiones proceden, en buena medida, de procesos energéticos y, en particular, de la producción de electricidad y de la obtención del combustible primario (crudo de petróleo, carbón, etc.), por lo que, a pesar de que sus cargas ambientales se imputan, en principio, dentro de los límites del sistema de producción de cemento, su ámbito de actuación afecta a entornos, en general, alejados de la planta cementera.

7.3.3 – Relativas a la producción del modelo nacional de inventarios de la producción de cemento

Las dificultades encontradas en los inventarios internacionales existentes y accesibles (CEMBUREAU y SimaPro) y ante la falta de representatividad (temporal y geográfica) de los mismos para los cementos españoles, hacen crecer la necesidad de realizar un inventario nacional de la producción del cemento.

El desarrollo de un inventario tipo en el ámbito nacional, deberá sentarse en bases sólidas y criterios para que sea integrable con inventarios de otros productos y con otros inventarios de cemento, pero de otros ámbitos (inventarios internacionales citados). En el afán de ese planteamiento integrable en la metodología usual de ACV, no se cambian ni los efectos considerados ni los programas informáticos existentes y, sí se cambia, diversos aspectos conceptuales y metodológicos que ayudan, tanto a la comprensión de los fenómenos, como a la valoración de cada parte. Por lo tanto, la propuesta deberá:

- Incorporar aspectos conceptuales relativos al ciclo de vida de la construcción y hacer un paralelismo con el del cemento, integrando este, en aquel. Este planteamiento permitirá una definición precisa de los límites que deben incorporarse en casa sistema o subsistema en los que se divida.
- Fundamentarse en una metodología científica que permita obtener la memoria ambiental (MA) de un producto, desglosada en los diferentes subsistemas en los que se puede desglosar el sistema global de obtención del mismo, facilitando la incorporación metodológica de otros planteamientos como el de la reciclabilidad.
- Definir una forma de abordar los temas de imputación de efectos desglosado en locales, regionales y globales, permitiendo un análisis separado, en función de la entidad que realice el mismo (planta de producción, administración local, autonómica, nacional y supranacional).

- Incorporar conceptos hasta ahora no considerados, con relación a los operarios que intervienen de forma directa en los procesos de producción de un producto (procesos fundamentales). Ello se hace a través de la visualización de que los operarios en fábrica, son el resultado de un proceso soporte, como es, los desplazamientos a la fábrica.

7.3.4 - Relativas a la campaña para elaboración del inventario del ciclo de vida de la producción de cemento de un caso real

De la campaña realizada para acotar los datos de entradas y salidas de la producción de cemento en un caso real de una fábrica en Cataluña, se extrae, las siguientes conclusiones:

- Evaluando el conjunto de estudios de ACV existentes en el campo del cemento y de sus derivados, se observa claramente que casi todos se han realizado en países del centro y del norte de Europa. Por lo tanto, faltan estudios principalmente en países del área mediterránea (p.ej.: España, Italia y Francia) donde se produce cerca del 50% del total del cemento fabricado en Europa.
- El principal recurso natural necesario para la fabricación de cemento portland es la caliza, y su explotación en régimen de cantera a cielo abierto, tiene una importante repercusión en ámbito local. Si por una parte aparece la alteración del paisaje y la ocupación de una superficie natural, por otra, está la contaminación por polvo, gases y ruidos, que repercute de forma negativa, principalmente, cuando existe algún núcleo habitado a cerca de la cantera.
- El consumo energético proviene de tres fuentes: el combustible (gasóleo) para las maquinarias (2%), la energía eléctrica suministrada por la red (11%) y el combustible fósil necesario para la quema de la materia prima en el horno (87%).
- La energía eléctrica sólo representa un 11% de la energía total, y se consume algo como, 420 MJ/t cemento portland. Este consumo, se reparte en todos los procesos de fabricación, resultando mucho más alto en las fases de trituración del crudo (consumo eléctrico del molino de crudo), cocción para transformar de crudo a clinker (la línea del horno) y la preparación del cemento (molino de cemento).
- Con respecto a las emisiones de gases a la atmósfera, confirmarse que las emisiones más altas son, las de dióxido carbónico CO₂, seguida en un plano más bajo por los óxidos de nitrógeno NO_x y dióxido de azufre SO₂.

-
- Las emisiones de CO₂ son muy altas, liberando a la atmósfera cerca de 970 kg. de CO₂/t cemento portland, lo cual representa, en el caso en estudio, más de 50.000 m³ CO₂/h en condiciones normales de presión y temperatura (1atm y 20° C). Del total de CO₂ liberado, el 53% proviene de la descarbonatación de la caliza dentro del horno; el 40%, de las reacciones producidas también en el horno por la combustión del carbón y solo el restante 7% proviene de la fabricación y consumo de la electricidad y del gasóleo.
 - Mientras aún no exista una legislación que limite las emisiones del CO₂, en cambio de NO_x y SO₂, está lejos de ser superada la indicada en la legislación vigente de estas emisiones (342mg NO_x/Nm³ liberados en los gases del horno ante los 1.800 permitidos y 0,01mg SO₂/Nm³ ante los 6.000 permitidos, respectivamente).
 - Del total de las emisiones de NO_x, el 12% corresponden al consumo de gasóleo, el 15% al consumo de energía eléctrica y el 73% a las reacciones producidas dentro del horno a causa de la combustión del carbón. Respecto al SO₂, el 3% corresponden al consumo de gasóleo, el 96,5% al consumo de energía eléctrica y sólo el 0,5% a las reacciones producidas dentro del horno principalmente a causa de la combustión del carbón.
 - Por lo que respecta a las fases de fabricación del cemento, el horno de clinker es el punto de mayor repercusión en todo el proceso, por el hecho de que es donde se produce proporcionalmente el mayor consumo energético y la mayor parte de las emisiones. En el horno, durante este proceso que da lugar a transformación del material crudo en clinker, es responsable por el 87% del consumo energético de todo el proceso y el 95% de las emisiones del CO₂. Las otras fases más significativas son las del molido tanto del crudo como del cemento, que se llevan cada una el 30% del total del consumo eléctrico de la fábrica.
 - Considerando que es en el horno donde están las mayores cargas ambientales del proceso de producción de cemento, no implica necesariamente que sea el único punto a tener en cuenta, es posible que en otras fases el proceso que no esté optimizado en cuanto al consumo de recursos y energía, también sea necesario emprender mejoras.
 - Desde el punto de vista del consumo de combustibles, el uso de combustibles secundarios, que son los productos clasificados como residuos (neumáticos, caucho, plásticos, aceites y disolventes usados; etc.), sería ventaja utilizarlos ya que por una parte se eliminan estos residuos que en caso contrario deberían llevarse a una incineradora; y por otra, se produce un ahorro de combustibles fósiles no renovables. Por lo que respecta a los gases liberados, las emisiones de gases son relativamente similares en la quema de los dos combustibles, mientras que si se utilizan los

combustibles fósiles tradicionales, las emisiones por la quema de los residuos se producen igualmente en las incineradoras, en cambio, con la quema de residuos se elimina una de las fuentes emisoras. Por lo tanto, hay que inventariar correctamente estos sistemas y valorar el uso de residuos.

- Para las fábricas cementeras quemar residuos puede representar un ahorro tanto económico como medioambiental, por cuanto se deja de consumir en combustibles fósiles. Además, puede suponer una salida a las restricciones de una posible ley que limite las emisiones de CO₂, ya que las emisiones producidas por la quema de residuos tendrían un tratamiento especial (por ejemplo, en forma de créditos de emisión equivalente), al tratarse de una solución con beneficio social.
- De la comparación con otros inventarios existentes se concluye que los valores obtenidos se encuentran dentro de la media de consumos y emisiones. Y dentro de esta regularidad, los consumos energéticos resultan ligeramente menores, así como las emisiones de NO_x y de SO₂, mientras que las emisiones de CO₂ son ligeramente más altas.
- El hecho de que los inventarios existentes estén confeccionados sin una metodología uniforme y no definan claramente el origen de los valores que presentan, dificulta explicar las posibles diferencias en los resultados de la campaña, con aquellos valores comparados que no difieren significativamente. Entre las causas que se apuntan para las diferencias están los límites de los sistemas considerados; Cuestiones de carácter técnico incluyendo la eficiencia o tipología de la maquinaria; y las características propias del crudo que afecta a la temperatura necesaria para su transformación en clinker.

7.4 - LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

A lo largo del trabajo presentado se ha puesto de relieve otras líneas futuras de investigación en el marco de los temas que se ha tratado en esta tesis. De entre ellas cabe destacar las que se exponen sucintamente a continuación.

7.4.1 - Estudios relativos a los inventarios del ciclo de vida de la producción de cemento

En la presente tesis se ha estudiado las bases y criterios que deben asentarse los inventarios del ciclo de vida de la producción de cemento mediante el concepto de representatividad (temporal y geográfica), siendo concluyente por la necesidad de realizar un inventario nacional. Una vía de consolidar la propuesta es realizarlo efectivamente, entretanto,

para eso es necesario que el sector cementero colabore asumiendo la responsabilidad por hacerlo, ya que así contribuiría, aún más, para ampliar la fiabilidad y la respectiva representatividad de los datos.

La creación de una red de información dentro del sector es una opción factible, lo que, requiere es la decisión política de instalarla, dado que la acción individual de un fabricante no sería una acción, aparentemente bien aceptada, por los demás productores. Asimismo la importancia de la información para el usuario es imprescindible, pues, éste necesita disponer de la información como medio de apoyo en sus procesos de decisión

7.4.2 - La sistematización informática para realizar estos inventarios

La elaboración de herramientas numéricas que resulten en un adecuado soporte informático, facilitaría la adquisición y gestión de estos datos, tanto en el ámbito interno del sector cementero como en la estructuración general de la información que necesita hacerse pública.

Es importante que esta informatización, que tenga como base, sistemas operativos ya existentes, tenga la compatibilidad adecuada para facilitar su integración a esas herramientas disponibles y así integrar en la realización del análisis del ciclo de vida de productos de la construcción.

7.4.3 - Estudios relacionados con el ACV de los productos derivados del cemento

Al mismo tiempo que se desarrollen inventarios para los cementos, se requiere un esfuerzo en paralelo de desarrollo de inventarios para los otros materiales componentes del hormigón (árido, aditivo, etc.). Estos inventarios del ciclo de vida, necesitan, por lo tanto, tener los mismos niveles de representatividad que los del cemento, para no distorsionar la evaluación del sistema analizado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bibliografías

Augenbroe, G. and Pearce, A.R. [1998] – *Sustainable Construction in the United States of America – A perspective to the year 2010* – Synthesis report for CIB World Congress– Centre for Construction and Environment – University Florida – (<http://www.arch.gatech.edu>)

Aguado, A. y Casanova, I [1997] – *Estructuras y Edificación(E-7) - Demolición y reutilización de estructuras de hormigón* – Publicación del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid – Grupo Español del Hormigón - GEHO / CEB y Asociación Técnica Española de Pretensado ATEP – Coordinación Antonio Aguado de Cea.

Agenda 21 – España [1999] – *Sustainable development – Information on Spain* – Organización de las Naciones Unidas – <http://www.un.org/esa/agenda21/natlinfo/countr/spain/index.htm>.

Álamo, L; Gonzáles, M.; Sumpsi, C. [1998] – *Sistemes de gestió ambiental* - Medi ambient i tecnologia – Guia ambiental de la UPC – Universitat Politècnica de Catalunya – Edicions UPC. ISBN 84.8301.278.2, pp. 187-199.

Anink, D.; Boonstra, C. and Mak, J. [1996] – *Handbook of Sustainable Building – An Environmental Preference Method for Selection of Materials for Use in Construction and Refurbishment* – ISBN 1-873936-38-9, London, 175 pp.

Atkinson, C.J. [1994] – *Life Cycle Studies and Ecolabelling of Building Materials* – British Ceramic Transactions, Vol. 93, No. 1, pp. 31-32.

Bannon, C.A. [1995] - *Environmental trends and developments in Europe*. Magazine World Cement, Nov.95.

Baumann, H. and Rydberg, T. [1994] – *Life Cycle Assessment - A Comparison of Three Methods for Impact Analysis and Evaluation* – Journal of Cleaner Production, Vol. 2, No. 1, 1994, pp. 13-20.

Blanchard, S. and Reppe, P. [1998] – *Life cycle analysis of a residential home in Michigan* – School of Natural Resources and Environmental – University of Michigan – partial These of Master of Science of Natural Resources. Sep. 1998 – 60 pp.

Boustead, Ian [1995] – *Life-cycle Assessment: an Overview* – Energy World, No. 230, July-Aug. 1995, pp. 7-11

Burneo, P.C. [1996] - *¿Desarrollo sustentable? Una solución a la crisis ambiental* – Revista Técnica 96 – Escuela Politécnica del Ejercito – ESPE, Ecuador, jun/96, pp. 31-38

Bossink, B.A.G and Brouwers, H.J.H [1996] – *Construction Waste: Quantification and Source Evaluation* – Journal of Construction Engineering and Management –ASCE – Vol. 122, No. 1 – march 1996, pp. 55-60.

European Environmental Agency [2000] – *Environmental signal 2000 – regular indicator report* – Copenhagen (www.eea.eu.int). 109 pp.

Clavería, A.P. et al [1996] – *La Enseñanza de la Arquitectura y del Medio Ambiente* – ITEC, OTC-COAC y UPC-ETSAB, IISBN 84-89698-34-1, Barcelona, 190 pp.

CML [1992] – *Environmental Life-Cycle Assessment Products – Guide – Backgrounds* – CML-TNO-B&G , NOH-9253/54, Leiden, 224 pp.

CML [1994] – *Guidelines for the Application of Life-cycle Assessment in the EU Ecolabelling Programs* – Final report of first phase – CML-TNO-B&G, Leiden, 13 pp.

Cardim, A., Josa, A. Aguado, A. y Gettú, R. [1997] – *Avaliação do Impacto ao Meio Ambiente Causados pelos Produtos e Materiais da Construção Civil a Base de Cimento* – In CON PAT'97 – IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle de Qualidade, Porto Alegre, Brasil, pp. 499-506.

Cardim, A., Aguado, A. y Josa, A. – [2000a] - *Inventarios de la producción de cemento, compilados de distintas fuentes* – “SimaPro” y “Cembureau”. - Informe parcial del Proyecto ACV - UPC/IECA - (DOC. 01.RP.01-00) – Ene/00 - 13 pp.

Cardim, A., Aguado, A. y Josa, A. – [2000b] - *Análisis del ciclo de vida de la producción de cemento*. - Informe parcial del Proyecto ACV - UPC/IECA – May/00 - 67 pp.

CEMBUREAU [1995] – *Concrete: The Benefit to the Environment* – Asociación Europea de Fabricantes de Cemento - Cembureau Project Group 2.6 – Bruselas, 95 pp.

CEMBUREAU [1998] – *Selection of LCI-Parameters* – Status report of the LCI Format Expert Group of Project Group 2.7 “Sustainability of Concrete” – Asociación Europea de Fabricantes de Cemento – Cembureau - Bruselas, 48 pp.

CEMBUREAU [1999] – “*CEMBUREAU LCI Format for cement*” - Asociación Europea de Fabricantes de Cemento - Cembureau - Brussels , February 1999.

CEMBUREAU [1999a] – “*Best Available Techniques*” for the Cement Industry: A contribution from the European Cement Industry to the exchange of information and preparation of the IPCC BAT REFERENCE Document for the cement industry. – European Cement Association – D/1999/5457/DECEMBER - Bruselas, 1999. 240 pp. [<http://www.cembureau.be>]

CEMBUREAU [1999b] – *Environmental Benefits of Using Alternative Fuels of Using Alternative Fuels in Cement Production* – Asociación Europea de Fabricantes de Cemento - Cembureau - Project Group of Cement Technology Experts – Bruselas, 23 pp.

Ecobilan [2000] – *LCA applied to Building* – The Ecobilan Group – http://ecobalance.com/service/project/proj_bld.html.

EPER [2000] – *Guidance Document for EPER implementation* – European Commission, Directorate-General for Environment, Brussels, November 2000.

Erixon, M and Agren, S [1998] – *An assessment of the SPOLD-format with comparisons between SPOLD and SPINE* – CPM report 1998:5 – Centre for Environmental Assessment of Products and Materials Systems – Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden – ISSN 1403-2694.

Fàbregas, J; Maña, F.; Vázquez, E. [1998] – *Construcció i medi ambient* - Medi ambient i tecnologia – Guia ambiental de la UPC – Universitat Politècnica de Catalunya – Edicions UPC. ISBN 84.8301.278.2, pp. 141-152.

Fullana, P. y Puig, R. [1997] - *Análisis del Ciclo de Vida* – Rubes Editorial, S.L. – ISBN 84-497-0070-1, Barcelona, 143 pp.

Fossdal, S. [1996] – *Windows in Existing Norwegian Buildings in a Sustainable Perspective – Life Cycle Assessment of New Windows and Old Windows Supplied with Inner Frames - Sustainable Use of Materials – Proceedings of an International Seminar BRE/RILEM – 23/24 set/1996*, Editors J. W. Llewellyn and H. Davies.

Generalitat de Catalunya [1996] – *Iniciació a l'Avaluació del Cicle de Vida – Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya, Direcció General de Qualitat Ambiental*, ISBN 84-393-3781-7, 194 pp.(en CATALA)

Glavind, M. and Munich-Petersen, C. [2000] – “*Gren*” *Concrete in Denmark – Structural Concrete – nº 1:1: 2000 – pp. 19-25.*

Grisel, Laurent et al. [1997] – *Database and Software's – LCANET Theme Report, LCANET meeting: From Life Cycle Assessment to Tolls for Chain Management*, Paris, 29 pp.

Guinée, J.B [1998] – *Environmental Life Cycle Assessment – Backgrounds – Draft - M.Gorree; R. Heijungs; G. Huppes; R. Kleijn H.A.; Udo de Haes; E. van der Voet and M.N. Wrisberg - J.B Guinée (final Editor) – October 1998.*

Hansen, K. And Krogh, H. [1996] – *Collection and Use of Environmental Data for Building Materials – Sustainable Use of Materials – Proceedings of an International Seminar BRE/RILEM – 23/24 set/1996*, Editors J. W. Llewellyn and H. Davies.

Herrero, J. [2000] - *Recursos naturales y desarrollo sostenible. Seminario D. Seminario Ciencia, Tecnología, Empresa y Sociedad en el siglo XXI. Universidad Internacional Menéndez Pelayo. Santander. Martes 19 de septiembre de 2000.*

Häkkinen, T. & Mäkelä, K. [1996] – *Environmental adaptation of concrete – Environmental impact of concrete and asphalt pavements. Technical Research Centre of Finland, Espoo. ISBN 951.38.1907.4*

IPCC - OCDE - AIE [1996a] - Houghton, JT et al. – *Greenhouse Gas Inventory – Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Reporting Instructions – Volume 1 – IPCC/OECD/IEA – Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambios Climáticos.*

IPCC - OCDE - AIE [1996b] - Houghton, JT et al.– *Libro de Trabajo para el Inventario de Gases de Efecto Invernadero – Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, Versión revisada en 1996 – Volume 2 – IPCC/OECD/IEA – Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambios Climáticos.*

IPCC - OCDE - AIE [1996c] Houghton, JT et al.– *Greenhouse Gas Inventory* – Revised 1996
IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Reference Manual – Volume 3 –
IPCC/OECD/IEA – Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambios Climáticos.

Josa, A. Aguado, A. y Gettú, R. [1996] – *Evaluación Medioambiental de Productos de La Construcción con Base Cemento* – In Conferencia Anual del ATEGRUS, pp. 274-283, Madrid-España

Josa, A. Aguado, A. y Gettu, R. [1997a] – *Evaluación Ambiental de Productos de La Construcción Derivados del Cemento* – CIC Información (I), No. 299/97, pp. 30-35. Barcelona - España.

Josa, A. Aguado, A. y Gettu, R. [1997b] – *Evaluación Ambiental de Productos de La Construcción Derivados del Cemento* – CIC Información (II), No. 300/97, pp. 49-55. Barcelona - España

Josa, A.; Cardim A.; Aguado, A; y Gettu, R. [1999a] – *Considerations in the life assessment of precast concrete products* – In 16th International Congress of precast concrete industry: Prefabrication on the eve of the third millennium, Venezia – May 25-28, 1999. Milano: Associazione Nazionale Industrie Manufatti Cementizi – pp. I/45-I/51.

Josa, A., Aguado, A. y Cardim, A. [1999b] – *Evaluación del programa SimaPro 4.0* - Informe parcial del Proyecto ACV - UPC/IECA -(DOC. 02.RP.05-99) – Nov/99 - 5 pp.

International Organization for Standardization – ISO – [1997] - 14.040 – *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework* – Genève – Switzerland, 12 pp.

International Organization for Standardization – ISO – [1997] - 14.040 – *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework* – Genève – Switzerland, 12 pp.

International Organization for Standardization – ISO – [1998] - 14.041 – *Environmental management – Life cycle assessment Goal and scope definition and inventory analysis* – Genève – Switzerland, 22 pp.

International Organization for Standardization – ISO – [2000] - 14.042 – *Environmental management – Life cycle assessment – Life cycle impact assessment* – Genève – Switzerland, 20 pp.

International Organization for Standardization – ISO – [2000] - *14.043 – Environmental management – Life cycle assessment – Life cycle interpretation* – Genève – Switzerland, 14 pp.

ITeC, [2000] – *Revisando el edificio verde* – Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña; In: <http://www.itec.es/save/cast/index.html>.

INTRON [1997] – *An overview of available LCI Data: Cement, concrete and other building materials* – Institute for Material and Environmental Research B.V. – INTRO Report nº 97079 – Jun/97 – 344 pp.

Kuhlmann K. and Paschmann H. [1996] – *Environmental Compatibility of Concrete from the Starting Materials Through to its Re-Utilization* – Betonwerk + Fertigteile-Technik, Vol. 62, No.1, Jan. 1996, pp.112-121.

Labahn, O. y Kohlaas, H. [1985] - *Prontuario del cemento* - Editores Técnicos Asociados. Barcelona.

Lindfors, Lars-Gunnar at al. – [1992] – *Product Life Cycle Assessment – Principles and Methodology* – Nord 1992:9 – Nordic Council of Ministers – Copenhagen, 1992, 288 pp.

Lindeijer, E.; Huppes, G. [1999] – *Portioning economic in-and outputs to product systems* – Draft working document for Dutch LCA manual update – Version 3.1 - January 1999 - IVAN Environmental Research. 30 pp.)

Lippiatt, B. [1998] – *Building for Environmental and Economic Sustainability (BEES)*. In: CIB World Buildings Congress – Construction and the Environment. Proceedings. Gävle. 8 pp.

Mañà Reixach, F. [1996] – *El ACV aplicado a los materiales y a las soluciones constructivas* – In I Jornadas: Construcción y Desarrollo Sostenible – Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Barcelona, 16-18/Mayo/1996 – pp. 180 –181.

Marland, G., Boden, T. and Andres, R.J. [2000] - *Global CO2 Emissions from Fossil-Fuel Burning, Cement Manufacture, and Gas Flaring: 1751-1997*. August 22,2000. CDIAC

Marsmann, M. [1996] – *Applicability of ISO 14040 Standards* – en Aplicacions Industrials de L'anàlisi del Cicle de Vida – Associació de Enginyers Industrials de Catalunya – Barcelona 26 i 27 de setembre de 1996, 20 pp.

- Mebratu, Desta [1998] – *Sustainability and Sustainable Development: Historical and Conceptual Review* – In: Environmental Impact Assessment (EIA) – Review. Vol. 18, pp 493-520.
- Menke, D. M., Davis, G.A. and Vigon, B.W. - [1996] – *Evaluation of life-cycle assessment tools* – Report prepared for Hazardous Waste Branch Environmental Canada – Aug/96. 56 pp.
- Nisbet, Michael and Van Geem, Martha G. [1997] – *Environmental Life Cycle Inventory of Portland Cement and Concrete* – World Cement, Vol. 28, No. 4, Apr. 1997, 3 pp.
- OFICEMEN [1997] – *Principales datos del sector cementero* – Agrupación de Fabricantes de Cemento de España – [<http://www.oficimen.com>]. IPCC - OCDE - AIE [1996]
- ONU- WCED [1987] – *Our Common Future* – Oxford University Press – London
- Onabolu, K. and Răman, T. [2000] – *A case study of development of LCA as a management tool in a building industry organisation*. In: Integrated Life-cycle Design of Materials and Structures – ILCDES 2000 – Ed. Sarja, A. Proceedings of the RILEM/CIB/ISO International Symposium, Helsinki, Finland – 22-24 may 2000 – pp. 517-521.
- Osset, P. [1996] – *Calculating the Environmental Impacts of Buildings* - UNEP Industry and Environment, Vol. 19, No. 2, Apr-Jun. 1996, pp. 32.
- Over Arup & Partners [1993] – *The Green Construction Handbook – A Manual for Clients and Construction Professionals* – JT Design Build Publication, London, 50 pp.
- PRé Consultants B.V. [1997a] – *SimaPro – The software tool to analyse and develop environmentally sound products – Single User Part 1 - User Manual* – 105 pp.
- PRé Consultants B.V. [1997b] – *SimaPro – The software tool to analyse and develop environmentally sound products – Single User Part 2 - Program Reference* – 169 pp.
- PRé Consultants, B.V. [1997c] - *SimaPro – The software tool to analyse and develop environmentally sound products – Single User Part 3 – Database Manual*. 65 pp.
- Palomar, Patricio [1998] - *El sector del cemento y su evolución*. Conferencia en la ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. 3 de diciembre

Ramírez, M.M. [2000] – *Aplicación de los métodos de la lógica difusa al proyecto y construcción de puentes* – Tesis Doctoral – ETSECCPB/UPC - Departamento de Ingeniería de la Construcción – Dirigida por Casas Rius, J.R. – Barcelona – ES – 273 pp.

SETAC [1993] – *A Conceptual Framework for Life-Cycle Impacts Assessment - Guidelines for Life-Cycle Assessment: A “Code of Practice”* – Society for Environmental Toxicology and Chemistry - Bruselas.

SETAC [1998] – *Evolution and development on the conceptual framework and methodology of life-cycle impact assessment* – Society for Environmental Toxicology and Chemistry – SETAC (North American and Europe) Workgroup on Life Cycle Impact Assessment – January 1998. 13 pp.

SETAC [1999] – *Life Cycle Assessment and Conceptually Related Programmes* – Society for Environmental Toxicology and Chemistry – SETAC (Europe Working Group). 28 pp.

Schuermans, A., Bijen, J. [1996] – *Sustainable of concrete – Stage 1: orientation* – INTRON 96095 – Netherlands. Report for CEMBUREAU.

Symonds Group [1999] – *Construction and Demolition Waste Management Practices, and their Economic Impacts* - Report to DGXI, European Commission – Final Report – By Symonds, in association with ARGUS, COWI and PCR Bouwcentrum. 207 pp.

Todd, J.A. and Curran, M.A. – [1999] – *Streamlined Life-Cycle Assessment: A final Report from the SETAC North America Streamlined LCA Workgroup* - SETAC Foundation for Environmental Education, July 1999 - 31 pp.

Trinius, Wolfram [1999] – *Environmental Assessment in Building and Construction – Goal and Scope Definition as Key to Methodology choices* – Kungliga Tekniska Högskolan, Estocolmo, PhD Tesis. ISBN 91.7170.479.5.

Trusty, W.B. and Meil, J.K. [1996] – *Sustainable Buildings: The ATHENA™ Project Approach – Athena™ Encourages Sustainable Building* - Sustainable Use of Materials – Proceedings of an International Seminar BRE/RILEM – 23/24 set/1996, Editores J. W. Llewellyn and H. Davies.

Trusty, W.B., Meil, J.K. and Noris, G.A. [1998] – *ATHENA: A LCA Decision Support the Building Community* – In: Proceedings: Green Building Challenge'98 – An International on the Performance Assessment of Building. Vancouver, B.C., October 26-28, 1998.

Trusty, W.B., Meil, J.K. [1999] - *Building Life Cycle Assessment: Residential Case Conference* – In: Proceedings Mainstreaming Green: Sustainable Design for Buildings Communities. Chattanooga, TN, October, 1999.

Trusty, W.B., Meil, J.K. [2000] – *Building as Products: Issues and Challenges for LCA* – Presentation at InLCA – EPA International Conference on Life Cycle Assessment: Tool Sustainability. Arlington, Virginia, April 2000.

UPM, [1989] - *Motores de combustión interna alternativos* - Publicaciones de la ETSII.

U.S. Department of Energy (DOE) [1998] - *Green Building Technical Manual* – U. S. Department of Energy (DOE), Public Technology, Inc. (PTI), U.S. Green Building Council (USBGC) and U.S. Environmental Protection Agency, 292 pp.

Ullman, A.L [1996] – *Using Life-Cycle Information for Competitive Advantage* - en Aplicacions Industrials de L'anàlisi del Cicle de Vida – Associació de Enginyers Industrials de Catalunya – Barcelona 26 i 27 de setembre de 1996, 8 pp.

Viñals, M. [2000] - *Dades d'inventari del cicle de vida de la fabricació del ciment portland. Obtenció i anàlisi en un cas real.* Tesina ETSECCP Barcelona. Tutors: Alejandro Josa y Antonio Aguado, Setembre 2000.

Weidema, B.P. and Wesnas, M.S. [1996] – *Data Quality Management for Life Cycle Inventories – an Example of Using Data Quality Indicators* – Journal Cleaner Production, Vol 4, No. 3-4, pp. 167-174.

Wenzel, H. et al. [1997] - *Environmental Assessment of Products. – Volume 2: Scientific background.* 565 pp. – Ed. Chapman & Hall, London, ISBN 0 412 80810 2.

Wrisberg, N. et al. [1997] - *A Strategic Research Programme for Life Cycle Assessment* – LCANET Theme Report, LCANET meeting: From Life Cycle Assessment to Tolls for Chain Management, Leiden, 28 pp.

White, R.M. [1990] - *Il grande dibattito sul clima.* Revista Le Scienze, n.265.

VDZ [2000] – *Umweltdaten der Deutschen Zement Industrie* – VDZ Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf, September 2000.

Vold, Mie and Rønning, Anne [1995] – *LCA of Cement and Concrete – Main Report* – Stiftelsen Østfoldforskning – Fredrikstad, ISBN 82-7220-213-2, 50 pp.

ANEJO 1

GLOSARIO

Glosario

Agotamiento / reducción

- Resultado de la extracción del recurso no renovable del medio ambiente o extracción de recurso renovable con bajo poder de renovación.

Análisis de fiabilidad

- Análisis de la fiabilidad a través de procedimiento sistemático para determinar y cuantificar la incertidumbre introducida en los resultados de un análisis del inventario del ciclo de vida.

Análisis de sensibilidad

- Procedimiento sistemático para estimar los efectos, acerca de los métodos y datos escogidos, en los resultados de un estudio del ACV.

Análisis del ciclo de vida - ACV

- Fase de valoración del ciclo de vida con el objetivo de entender, evaluar la magnitud e importancia de los impactos medioambientales potenciales de un sistema de producción.

Análisis global del ciclo de vida – ACV global

- ACV extendido a diversos aspectos (medioambientales, socio-económicos, seguridad, etc.).

Análisis medioambiental del ciclo de vida – ACV medioambiental

- ACV centrado o limitado a aspectos medioambientales, o parte relativa a aspectos medioambientales de un ACV global.

Análisis comparativo

- Relación de aspecto medioambientales con respecto a la superioridad o equivalencia de un producto contra un otro producto competente que cumpla la misma función.

Análisis de causas predominantes

- Identificación de las causas principales de los impactos medioambientales producidos por un proceso o producto, en particular en el caso de un perfil medioambiental deficiente.

Asignación

- Fase del ACV en lo cual determinase como se distribuye los flujos de entrada o salidas de una unidad de proceso, en el interior del sistema de producción, sometido al estudio.

Aspecto medioambiental

- Sistemática actividades de una organización, (producto o servicio) con interactiva acción en el medio ambiente.

Categoría de impacto

- Grupo representativo de potenciales impactos al medio ambiente, a los cuales se asignan los resultados del inventario del ciclo de vida.

Ciclo de vida

- Fases consecutivas y conectadas de un sistema de producción, que puede incluir desde la adquisición de materias primas o de recursos naturales hasta la disposición final.

Clasificación.

- Etapa de valoración de los impactos en que los parámetros del inventario son agrupados por categorías de impacto.

Coproducto

- Dos o más productos de la misma unidad del proceso.

Daño

- Una deterioración de la calidad del medio ambiente no directamente atribuible a una depreciación o contaminación.

Definición de objetivos

- El primer etapa del análisis del ciclo de vida en la cual es definida la aplicación los resultados, las razones para la realización y publico blanco del ACV.

Diagrama de procesos

- Representación gráfica de proceso productivo de lo cual se hace el análisis de ciclo de vida.

Efecto medioambiental

- Interacción física entre el sistema de producción y el medio ambiente, definido en términos de la extracción de recursos, emisiones de sustancias al medio ambiente, área ocupada por la planta y residuos, etc.

Emisión

- Descarga de elementos químicos o físicos (sustancias, calor, ruido, etc.) de un sistema de producción al medio ambiente.

Entrada

- Material o energía que entra en un sistema o subsistema de un proceso de producción (los Materiales pueden incluir recursos materias primas y productos).

Evaluación

- Segundo paso dentro de la fase de interpretación del ciclo de vida para establecer confianza en los resultados del ACV o ICV estudiado incluyendo el chequeo de integridad, chequeo de sensibilidad, chequeo de consistencia, o cualquier otra aprobación que sea necesaria según la definición del objetivo y alcance del estudio.

Factor de caracterización

- Factor derivado de un modelo que se aplica para convertir los resultados asignados de un ICV en unidades equivalentes de una sustancia con potencial capacidad de promover el impacto al medio ambiente.

Flujo productivo

- Flujo de un proceso productivo cualquier, constituido de bienes, materiales, servicios, energía, residuos, etc.

Flujo elemental

- Material o energía introducido en el sistema, sometido a estudio, que ha sido sacado del medio ambiente sin la previa transformación humana. o

- Material o energía salido del sistema, sometido a estudio, que ha sido desechado en el medio ambiente sin una subsiguiente transformación

Flujo de energía

- Entrada o salida de una unidad del proceso del sistema producción, cuantificado en unidades de energía.

Impacto medioambiental

- Consecuencia atribuida al flujo de entrada o salida de un sistema de producción al medio ambiente

Indicador de la categoría de impacto

- Representación cuantificable de una categoría de impacto.

Indicador de impacto

- Atributo o aspecto natural del medio ambiente, salud humana o recursos, que se identifica como una preocupación o problema ambiental.

Indicador de impacto normalizado

- Indicador de impacto definido en una escala de impactos globales de una cierta área, o periodo, previsto por el modelo utilizado en el análisis.

Indicador medioambiental

- Parámetro representativo del daño de un producto al medio ambiente, obtenido por el análisis de ciclo de vida.

Inventario del ciclo de vida

- La fase del análisis de ciclo de vida donde se condensa y cuantifica las entradas y salidas de un determinado sistema de producción a lo largo de su ciclo de vida.

Interpretación de ciclo de vida

- Fase del análisis del ciclo de vida en que los resultados del análisis del inventario o la valoración del impacto, o ambos, son combinados con los objetivos y alcance del estudio para obtener conclusiones y recomendaciones.

Límites del sistema

- Interfaces entre un sistema de producción y el medio ambiente u otros sistemas de producción.

Material

- Material primario o secundario que se usa para producir un determinado producto.

Perfil medioambiental

- Lista valorada de todas las acciones sobre el medio ambiente asociado con el ciclo de vida de un producto según determinados criterios.

Perfil medioambiental normalizado

- Perfil medioambiental constituido por índices de impactos normalizados.

Polución

- Consecuencia de las emisiones para el medio ambiente de una indeseable sustancia o emisión.

Producto

- Bien rentable o servicio producido por un proceso económico, que no requiere, a priori, ninguna transformación adicional para su uso.

Recurso

- Material existente en el medio ambiente el cual puede ser explotado del medio ambiente por procesos económicos. Estos son recursos bióticos o abióticos.

Recursos abióticos

- Recursos minerales y por tanto considerados recursos no renovables.

Residuo

- Cualquier salida del producto que es desechada.

Salidas

- Material o energía que dejan el subsistema o sistema en el proceso de producción (los materiales pueden incluir recursos, productos intermedios, productos, emisiones y residuos).

Sistema medioambiental

- El medio ambiente y todos los procesos que ocurren en ello.

Sistema de producción

- Conjunto de unidades del proceso materialmente y energéticamente conectadas que realizan uno o más funciones definidas.

Tabla de inventario

- Lista de elementos directamente asociados al producto los cuales son obtenidos del sistema de producción y que tienen efectos potenciales sobre el medio ambiente.

Unidad funcional

- Especificación física o funcional de un producto o sistema productivo para su uso como unidad de referencia en un estudio de análisis del ciclo de vida.

Unidad del proceso

- La porción más pequeña de un sistema de análisis que reúne los datos necesarios para realizar el análisis del ciclo de vida.

Valoración del impacto del ciclo de vida

- Fase de valoración del análisis del ciclo de vida con el objetivo de entender, evaluar la magnitud e importancia de los impactos potenciales al medio ambiente promovidos por un sistema de producción.

ANEJO 2

INVENTARIOS DE LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO

Sistema	Producción de cemento	
Composición	Subsistema de producción de clinker + subsistema de producción de cemento	
Origen	Inventarios del "SimaPro"	País: Holanda
Nomenclatura original	Cement Portland I	
Hoja:	1-4 Analisis del inventario - producción de cemento	
Fuente	SimaPro 4.0 - PRé Consultants, 1997	Hoja 01/04

Entradas - Material v Energía

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (materiales) (con respecto a la producción de 0,94 kg de clinker)	Cantidad de material (kg)	contribución (%)	Entrada (materiales) (con respecto a la producción de 1kg de cemento)	Cantidad de material (kg)	contribución (%)
01. Marga	1,60E+00	86%	09. Clinker	9,40E-01	100%
02. Adiciones	2,70E-01	14%	10.		
03.			11.		
04.			12.		
05.			13.		
06.			14. Suma	9,40E-01	100%
07.			15. Yeso	6,00E-02	
08. Suma	1,87E+00	100%	16. Rendimiento - clinker / material crudo (kg/kg)		50%
17. Clasificación (ENV 197-1): Tipo I - Portland cement					

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (energías) (con respecto a la producción de 0,94 kg de clinker)	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)	Entrada (energías) (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)
18. Electricidad	1,96E-01	5%	22. Electricidad	1,22E-01	13%
19. Energía térmica	3,38E+00	95%	23. Energía térmica	8,46E-01	87%
20.			24.		
21. Suma	3,58E+00	100%	25. Suma	9,68E-01	100%
26. Rendimiento: material crudo / energía térmica		55%			

Salidas - Emisiones al aire

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Salidas (con respecto a la producción de 0,94 kg de clinker)	Cantidad (kg)	contribución (%)	Salidas (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad (kg)	contribución (%)
27. As ^{(1) (L)}	6,91E-11	0%	52. As ^{(2) (L)}	4,00E-11	0%
28. Benceno ^{(1) (R)}	2,22E-07	0%	53. Benceno ^{(2) (R)}	1,28E-07	0%
29. Cd ^{(1) (L)}	7,12E-11	0%	54. Cd ^{(3) (L)}	4,00E-11	0%
30. CO ⁽³⁾	2,16E-05	0%	55. CO ⁽³⁾	1,54E-05	0%
31. CO ₂ ^{(3) (G)}	2,65E-01	100%	56. CO ₂ ^{(3) (G)}	8,97E-02	89%
32. CH ₄ ^{(1) (R)}	3,49E-08	0%	57. CH ₄ ^{(1) (R)}	2,18E-08	0%
33. Cr ^{(1) (L)}	2,78E-10	0%	58. Cr ^{(1) (L)}	1,60E-10	0%
34. Cu ^{(1) (L)}	6,77E-11	0%	59. Cu ^{(1) (L)}	4,00E-11	0%
35. CxHv ^{(1) (R)}	1,58E-05	0%	60. CxHv ^{(1) (R)}	2,04E-05	0%
36. Etilbenceno ^{(1) (L)}	1,01E-08	0%	61. HCl ^{(1) (R)}	6,54E-09	0%
37. Formaldehído ^{(1) (L)}	1,50E-08	0%	62. Metales ^{(1) (L)}	1,04E-09	0%
38. HCl ^{(1) (R)}	1,49E-08	0%	63. Ni ^{(1) (L)}	4,00E-11	10%
39. Metales ^{(1) (L)}	2,54E-09	0%	64. NO ₂ ^{(2) (R)}	1,29E-04	0%
40. Naftaleno ^{(1) (R)}	1,74E-09	0%	65. NOx ^{(1) (R)}	6,08E-05	0%
41. Ni ^{(1) (L)}	6,91E-11	0%	66. Polvo (SPM) ^{(3) (L)}	1,00E-02	0%
42. NO ₂ ^{(2) (R)}	6,14E-04	0%	67. SO ₂ ^{(1) (R) (L)}	5,72E-06	0%
43. NOx ^{(1) (R)}	1,53E-04	0%	68. Soot(hollín) ^{(3) (L)}	6,94E-06	0%
44. Pb ^{(1) (L)}	2,09E-10	0%	69. SOx ^{(3) (L) (R)}	3,55E-04	0%
45. Pentano ^{(1) (L)}	2,30E-08	0%	70. Tolueno ^{(1) (R)}	3,12E-07	0%
46. Polvo (SPM) ^{(3) (L)}	9,17E-06	0%	71.		
47. SO ₂ ^{(1) (R) (L)}	1,60E-05	0%	72.		
48. Soot(hollín) ^{(3) (L)}	2,25E-06	0%	73.		
49. SOx ^{(3) (L) (R)}	4,90E-05	0%	74.		
50. Tolueno ^{(1) (R)}	5,42E-07	0%	75.		
51. Suma	2,66E-01	100%	76. Suma	1,00E-01	100%

Emisiones procedentes de la producción de combustibles y energías⁽¹⁾, planta producción de cemento⁽²⁾ y procedentes de todos subsistemas⁽³⁾
Emisiones causadoras de impacto ambiental con efecto Global^(G), Regional^(R) y Local^(L)

Sistema	Cement Portland I	Caracterización	Hoja	02/04
----------------	--------------------------	------------------------	-------------	--------------

1. Impacto de Efecto Global

1.1 Efecto Invernadero (Calentamiento Global)

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	CO2 equivalente parcial (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
CO2	2,65E-01	1	2,65E-01		100%
CH4	3,49E-08	11	3,84E-07		0%
				2,65E-01	100%
Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	CO2 equivalente parcial (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
CO2	8,97E-02	1	8,97E-02		100%
CH4	2,18E-08	11	2,40E-07		0%
				8,97E-02	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			CO2 equivalente (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER			2,65E-01		75%
Subsistema de producción de CEMENTO			8,97E-02		25%
				3,55E-01	100%

2. Impacto de Efecto Regional

2.1 Acidificación

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SO2 equivalente parcial (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
HCl	1,49E-08	0,88	1,31E-08		0%
NO2	6,14E-04	0,70	4,30E-04		71%
NOx	1,53E-04	0,70	1,07E-04		18%
SO2	1,60E-05	1	1,60E-05		3%
SOx	4,90E-05	1	4,90E-05		8%
				6,02E-04	100%
Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SO2 equivalente parcial (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
HCl	6,54E-09	0,88	5,76E-09		0%
NO2	1,29E-04	0,70	9,03E-05		18%
NOx	6,08E-05	0,70	4,26E-05		9%
SO2	5,72E-06	1	5,72E-06		1%
SOx	3,55E-04	1	3,55E-04		72%
				4,94E-04	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			SO2 equivalente (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER			6,02E-04		55%
Subsistema de producción de CEMENTO			4,94E-04		45%
				1,10E-03	100%

2.2 Eutrofización

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	PO4 equivalente parcial (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
NO2	6,14E-04	0,13	7,98E-05		80%
NOx	1,53E-04	0,13	1,99E-05		20%
				9,97E-05	100%

Sistema	Cement Portland I	Caracterización	Hoja	03/04
----------------	--------------------------	------------------------	-------------	--------------

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	PO4 equivalente parcial (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
NO2	1,29E-04	0,13	1,68E-05		68%
NOx	6,08E-05	0,13	7,90E-06		32%
					2,47E-05
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			PO4 equivalente (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER			9,97E-05		80%
Subsistema de producción de CEMENTO			2,47E-05		20%
				1,24E-04	100%

2.3 Contaminación de verano (Formación fotoquímica de ozono)

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	C2H4 equivalente parcial (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Benceno	2,22E-07	0,189	4,20E-08		1%
CxHy	1,58E-05	0,398	6,29E-06		94%
CH4	3,49E-08	0,007	2,44E-10		0%
Etilbenceno	1,01E-08	0,593	5,99E-09		0%
Formaldehído	1,50E-08	0,421	6,32E-09		0%
Naftaleno	1,74E-09	0,761	1,32E-09		0%
Pentano	2,30E-08	0,408	9,38E-09		0%
Tolueno	5,42E-07	0,563	3,05E-07		5%
					6,66E-06

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	C2H4 equivalente parcial (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Benceno	1,28E-07	0,189	2,42E-08		0%
CxHy	2,04E-05	0,398	8,12E-06		98%
CH4	2,18E-08	0,007	1,53E-10		0%
Tolueno	3,12E-07	0,563	1,76E-07		2%
					8,32E-06

Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			C2H4 equivalente (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER			6,66E-06		44%
Subsistema de producción de CEMENTO			8,32E-06		56%
				1,50E-05	100%

3. Impacto de Efecto Local

3.1 Contaminación de invierno (Contaminación del aire por partículas en suspensión)

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SPM equivalente parcial (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Polvo (SPM)	9,17E-07	1	9,17E-07		1%
SO2	1,60E-05	1	1,60E-05		23%
SOx	4,90E-05	1	4,90E-05		72%
Soot(hollín)	2,25E-06	1	2,25E-06		3%
				6,82E-05	100%

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SPM equivalente parcial (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Polvo (SPM)	1,00E-02	1	1,00E-02		96%
SO2	5,72E-06	1	5,72E-06		0%
SOx	3,55E-04	1	3,55E-04		3%
Soot(hollín)	6,94E-06	1	6,94E-06		0%
				1,04E-02	100%

Sistema	Cement Portland I	Caracterización	Hoja	04/04
----------------	--------------------------	------------------------	-------------	--------------

Sistema: Producción de CEMENTO			
Subsistemas	SPM equivalente (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER	6,82E-05		1%
Subsistema de producción de CEMENTO	1,04E-02		99%
		1,04E-02	100%

3.2 Carcinógenos

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	B(a)P equivalente parcial (kg)	B(a)P equiv. total (kg)	contribución (%)
As	6,91E-11	0,044	3,04E-12		22%
Benceno	2,22E-07	0,000044	9,77E-12		72%
Etilbenceno	1,01E-08	0,000044	4,44E-13		3%
Ni	6,91E-11	0,0044	3,04E-13		2%
				1,36E-11	100%

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	B(a)P equivalente parcial (kg)	B(a)P equiv. total (kg)	contribución (%)
As	4,00E-11	0,044	1,76E-12		23%
Benceno	1,28E-07	0,000044	5,63E-12		74%
Ni	4,00E-11	0,0044	1,76E-13		2%
				7,57E-12	100%

Sistema: Producción de CEMENTO			
Subsistemas	B(a)P equivalente (kg)	B(a)P equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER	1,36E-11		64%
Subsistema de producción de CEMENTO	7,57E-12		36%
		2,11E-11	100%

3.3 Metales Pesados

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	Pb equivalente parcial (kg)	Pb equiv. total (kg)	contribución (%)
Cd	7,12E-11	50	3,56E-09		94%
Pb	2,09E-10	1	2,09E-10		6%
				3,77E-09	100%

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	Pb equivalente parcial (kg)	Pb equiv. total (kg)	contribución (%)
Cd	4,00E-11	50	2,00E-09		100%
				2,00E-09	100%

Sistema: Producción de CEMENTO			
Subsistemas	Pb equivalente (kg)	Pb equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER	3,77E-09		65%
Subsistema de producción de CEMENTO	2,00E-09		35%
		5,77E-09	100%

--

<i>Sistema</i>	Producción de cemento	
<i>Composición</i>	Sistema de producción de cemento	
<i>Origen</i>	Inventarios del "Cembureau" -	País: Suiza
<i>Nomenclatura original</i>	Cement CH	
<i>Hoja de trabajo</i>	1-3 Analisis del inventario - producción de cemento	
<i>Fuente</i>	Inventario disponible en Informe Cembureau	Hoja 01/03

Entradas - Material y Energía

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
<i>Entrada (materiales)</i> (con respecto a la producción de 0,97 kg de clinker)	Cantidad de material (kg)	contribución (%)	<i>Entradas - materiales</i> (con respecto a la producción de 1kg de cemento)	Cantidad de material (kg)	contribución (%)
01. Caliza	1,15E+00	77%	09. Clinker*	9,70E-01	100%
02. Marga	3,46E-01	23%	10.		
03.			11.		
04.			12.		
05.			13.		
06.			14. Suma	9,70E-01	100%
07.			15. Yeso	3,00E-02	
08. Suma	1,50E+00	100%	16. Rendimiento - clinker / material crudo (kg/kg)		65%
17. Clasificación (ENV 197-1): Tipo I - Portland cement			*valor estimado restando de 1kg la cantidad de yeso		

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
<i>Entrada (energías)</i>	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)	<i>Entrada (energías)</i> (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)
18. Electricidad	n.e.		22. Electricidad	5,57E-01	16%
19. Energía térmica	n.e.		23. Energía térmica	2,98E+00	84%
20.			24.		
21. Suma			25. Suma	3,54E+00	100%
26. Rendimiento: material crudo / energía térmica 50%					

Salidas - Emisiones

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Salidas	Cantidad (kg)	contribución (%)	Salidas (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad (kg)	contribución (%)
27.			52. As ^(L)	1,40E-08	0%
28.			53. Cd ^(L)	7,50E-08	0%
29.			54. CO	1,30E-04	0%
30.			55. CO ₂ ^(G)	8,10E-01	100%
31.			56. Cr ^(L)	1,00E-07	0%
32.			57. Hg ^(L)	3,70E-08	0%
33.			58. Ni ^(L)	1,20E-07	0%
34.			59. NO ₂ ^(R)	2,00E-03	0%
35.			60. Pb ^(L)	2,20E-07	0%
36.			61. Polvo (SPM) ^(L)	3,00E-04	0%
37.			62. SO ₂ ^{(R)(L)}	6,00E-04	0%
38.			63. Zn	3,10E-07	0%
39.			64.		
40.			65.		
41.			66.		
42.			67.		
43.			68.		
44.			69.		
45.			70.		
46.			71.		
47.			72.		
48.			73.		
49.			74.		
50.			75.		
51. Suma			76. Suma	8,13E-01	100%

Emisiones causadoras de impacto ambiental de efecto Global^(G), Regional^(R) y Local^(L)
 n.e. - no estimado

Sistema	Cement CH	Caracterización	Hoja	02/03
----------------	------------------	------------------------	-------------	--------------

1. Impacto de Efecto Global

1.1 Efecto Invernadero (Calentamiento Global)

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	CO2 equivalente parcial (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
CO2	8,10E-01	1	8,10E-01		100%
				8,10E-01	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			CO2 equivalente (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			8,10E-01		100%
				8,10E-01	100%

2. Impacto de Efecto Regional

2.1 Acidificación

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SO2 equivalente parcial (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
NO2	2,00E-03	0,70	1,40E-03		70%
SO2	6,00E-04	1	6,00E-04		30%
				2,00E-03	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			SO2 equivalente (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			2,00E-03		100%
				2,00E-03	100%

2.2 Eutrofización

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	PO4 equivalente parcial (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
NO2	2,00E-03	0,13	2,60E-04		100%
				2,60E-04	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			PO4 equivalente (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			2,60E-04		100%
				2,60E-04	100%

3. Impacto de Efecto Local

3.1 Contaminación de invierno

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SPM equivalente parcial (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Polvo (SPM)	3,00E-04	1	3,00E-04		33%
SO2	6,00E-04	1	6,00E-04		67%
				9,00E-04	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			SPM equivalente (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			9,00E-04		100%
				9,00E-04	100%

Sistema	Cement CH	Caracterización	Hoja	03/03
----------------	------------------	------------------------	-------------	--------------

3.2 Carcinógenos

Subsistema: Producción de CEMENTO

Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	B(a)P equivalente parcial (kg)	B(a)P equiv. total (kg)	contribución (%)
As	1,40E-08	0,044	6,16E-10		54%
Ni	1,20E-07	0,0044	5,28E-10		46%
					1,14E-09

Sistema: Producción de CEMENTO

Subsistemas	B(a)P equivalente (kg)	B(a)P equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO	1,14E-09		100%
		1,14E-09	100%

3.3 Metales Pesados

Subsistema: Producción de CEMENTO

Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	Pb equivalente parcial (kg)	Pb equiv. total (kg)	contribución (%)
Cd	7,50E-08	50	3,75E-06		94%
Hg	3,70E-08	1	3,70E-08		1%
Pb	2,20E-07	1	2,20E-07		5%
				4,01E-06	100%

Sistema: Producción de CEMENTO

Subsistemas	Pb equivalente (kg)	Pb equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO	4,01E-06		100%
		4,01E-06	100%

--

<i>Sistema</i>	Producción de cemento	
<i>Composición</i>	Producción de cemento	
<i>Origen</i>	Inventarios - "Cembureau" -	País: Suecia
<i>Nomenclatura original</i>	Cement N	
<i>Hoja de trabajo</i>	1-3 Análisis del inventario - producción de cemento	
<i>Fuente</i>	Inventario disponible en Informe Cembureau	Hoja 01/03

Entradas - Material y Energía

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
<i>Entrada (materiales)</i> (con respecto a la producción de 0,95 kg de clinker)	Cantidad de material (kg)	contribución (%)	<i>Entrada (materiales)</i> (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad de material (kg)	contribución (%)
01. Caliza	1,64E+00	100%	09. Clinker**	9,50E-01	100%
02.			10.		
03.			11.		
04.			12.		
05.			13.		
06.			14. Suma	9,50E-01	100%
07.			15. Yeso**	5,00E-02	
08. Suma	1,64E+00	100%	16. Rendimiento - clinker / material crudo (kg/kg)		58%
17. Clasificación (ENV 197-1): Tipo I - Portland cement			**valores estimados con base en la ENV 197-1		

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
<i>Entrada (energías)</i>	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)	<i>Entrada (energías)</i> (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)
18. Electricidad	n.e.		22. Electricidad	5,57E-01	13%
19. Energía térmica	n.e.		23. Energía térmica	3,85E+00	87%
20.			24.		
21. Suma			25. Suma	4,41E+00	100%
26. Rendimiento: material crudo / energía térmica 43%					

Salidas - Emisiones al aire

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Salidas	Cantidad (kg)	contribución (%)	Salidas (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad (kg)	contribución (%)
27.			49. Aldehído ^(L)	2,97E-08	0%
28.			50. Amonia (NH3) ^(R)	5,61E-09	0%
29.			51. Cd ^(L)	1,04E-08	0%
30.			52. CH4 ^(G) (R)	3,13E-04	0%
31.			53. CO	8,17E-04	0%
32.			54. CO2 ^(G)	8,13E-01	99%
33.			55. Cr ^(L)	1,70E-08	0%
34.			56. Cu ^(R)	2,57E-09	0%
35.			57. Fluorides	1,15E-10	0%
36.			58. HC	5,10E-05	0%
37.			59. Hg ^(L)	3,49E-09	0%
38.			60. N2O ^(G)	2,21E-06	0%
39.			61. NOx ^(R)	2,09E-03	0%
40.			62. N-tot	5,37E-08	0%
41.			63. PAHs ^(R) (L)	3,36E-10	0%
42.			64. Pb ^(L)	8,68E-09	0%
43.			65. Polvo (SPM) ^(L)	1,81E-04	0%
44.			66. SO2 ^(R) (L)	6,71E-04	0%
45.			67. TI	1,04E-07	0%
46.			68. VOC ^(R)	1,29E-04	0%
47.			69. Zn	1,29E-08	0%
48. Suma			70. Suma	8,17E-01	100%
1. Emisiones que causan impactos ambientales con efecto Global ^(G) , Regional ^(R) o Local ^(L) n.e. - no estimado					

Sistema	Cement N	Caracterización	Hoja	02/03
----------------	-----------------	------------------------	-------------	--------------

1. Impacto de Efecto Global

1.1 Efecto Invernadero (Calentamiento Global)

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	CO2 equivalente parcial (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
CO2	8,13E-01	1	8,13E-01		100%
CH4	3,13E-04	11	3,44E-03		0%
N2O	2,21E-06	270	5,97E-04		0%
				8,17E-01	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			CO2 equivalente (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			8,17E-01		100%
				8,17E-01	100%

2. Impacto de Efecto Regional

2.1 Acidificación

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SO2 equivalente parcial (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Amonia (NH3)	5,61E-09	1,88	1,05E-08		0%
NOx	2,09E-03	0,70	1,46E-03		69%
SO2	6,71E-04	1	6,71E-04		31%
				2,13E-03	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			SO2 equivalente (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			2,13E-03		100%
				2,13E-03	100%

2.2 Eutrofización

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	PO4 equivalente parcial (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Amonia (NH3)	5,61E-09	0,33	1,85E-09		0%
NOx	2,09E-03	0,13	2,72E-04		100%
				2,72E-04	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			PO4 equivalente (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			2,72E-04		100%
				2,72E-04	100%

2.3 Contaminación de verano (Formación fotoquímica de ozono)

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	C2H4 equivalente parcial (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Aldeidos	2,97E-08	0,443	1,32E-08		0%
CH4	3,13E-04	0,007	2,19E-06		4%
PAH's	3,36E-10	0,761	2,56E-10		0%
VOC	1,29E-04	0,398	5,13E-05		96%
				5,35E-05	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			C2H4 equivalente (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			5,35E-05		100%
				5,35E-05	100%

Sistema	Cement N	Caracterización	Hoja	03/03
----------------	-----------------	------------------------	-------------	--------------

3. Impacto de Efecto Local

3.1 Contaminación de invierno (Contaminación del aire por partículas en suspensión)

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SPM equivalente parcial (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Polvo (SPM)	1,81E-04	1	1,81E-04		21%
SO2	6,71E-04	1	6,71E-04		79%
				8,52E-04	100%

Sistema: Producción de CEMENTO			
Subsistemas	SPM equivalente (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO	8,52E-04		100%
		8,52E-04	100%

3.2 Carcinógenos

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	B(a)P equivalente parcial (kg)	B(a)P equiv. total (kg)	contribución (%)
PAH's	3,36E-10	1	3,36E-10		100%
					3,36E-10

Sistema: Producción de CEMENTO			
Subsistemas	B(a)P equivalente (kg)	B(a)P equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO	3,36E-10		100%
		3,36E-10	100%

3.3 Metales Pesados

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	Pb equivalente parcial (kg)	Pb equiv. total (kg)	contribución (%)
Cd	1,04E-08	50	5,20E-07		98%
Hg	3,49E-09	1	3,49E-09		1%
Pb	8,68E-09	1	8,68E-09		2%
				5,32E-07	100%

Sistema: Producción de CEMENTO			
Subsistemas	Pb equivalente (kg)	Pb equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO	5,32E-07		100%
		5,32E-07	100%



Sistema	Producción de Cemento	
Composición	Subsistema de producción de cemento	
Origen	Inventarios - "Cembureau" -	País: Holanda
Nomenclatura original	Portlandcement NL1	
Hoja de trabajo	1-3 Análisis del inventario - producción de cemento	
Fuente	Inventario disponible en Informe Cembureau	Hoja 01/03

Entradas - Material y Energía

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (materiales) <small>(con respecto a la producción de 0,94 kg de clinker)</small>	Cantidad de material (kg)	contribución (%)	Entrada (materiales) <small>(con respecto a la producción de 1 kg de cemento)</small>	Cantidad de material (kg)	contribución (%)
01. Caliza	1,60E+00	100%	09. Clinker*	9,40E-01	100%
02.			10.		
03.			11.		
04.			12.		
05.			13.		
06.			14. Suma	9,40E-01	100%
07.			15. Yeso	6,00E-02	
08. Suma	1,60E+00	100%	16. Rendimiento - clinker / material crudo (kg/kg)		59%
17. Clasificación (ENV 197-1): Tipo I - Portland cement			*valor estimado restando de 1 kg la cantidad de yeso		

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (energías) <small>(con respecto a la producción de 0,94 kg de clinker)</small>	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)	Entrada (energías) <small>(con respecto a la producción de 1 kg de cemento)</small>	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)
18. Electricidad	1,96E-01		22. Electricidad	1,22E-01	100%
19. Energía térmica	3,38E+00		23.		
20.			24.		
21. Suma	3,58E+00		25. Suma	1,22E-01	100%
26. Rendimiento: material crudo / energía térmica		47%			

Salidas - Emisiones al aire

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Salidas	Cantidad (kg)	contribución (%)	Salidas <small>(con respecto a la producción de 1 kg de cemento)</small>	Cantidad (kg)	contribución (%)
27.			52. CO	2,94E-03	0%
28.			53. CO ₂ ^(G)	8,53E-01	98%
29.			54. NO _x ^(R)	2,58E-03	0%
30.			55. Polvo (SPM) ^(L)	7,50E-03	1%
31.			56. SO ₂ ^{(R)(L)}	8,50E-05	0%
32.			57. VOC ^(R)	3,00E-06	0%
33.			58.		
34.			59.		
35.			60.		
36.			61.		
37.			62.		
38.			63.		
39.			64.		
40.			65.		
41.			66.		
42.			67.		
43.			68.		
44.			69.		
45.			70.		
46.			71.		
47.			72.		
48.			73.		
49.			74.		
50.			75.		
51. Suma			76. Suma	8,66E-01	100%

1. Emisiones causadoras de impacto ambiental con efecto Global^(G), Regional^(R) y Local^(L)

Sistema	Portlandcement NL1	Caracterización	Hoja	02/03
----------------	---------------------------	------------------------	-------------	--------------

1. Impacto de Efecto Global

1.1 Efecto Invernadero (Calentamiento Global)

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	CO2 equivalente parcial (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
CO2	8,53E-01	1	8,53E-01		100%
				8,53E-01	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			CO2 equivalente (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			8,53E-01		100%
				8,53E-01	100%

2. Impacto de Efecto Regional

2.1 Acidificación

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SO2 equivalente parcial (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
NOx	2,58E-03	0,70	1,81E-03		96%
SO2	8,50E-05	1	8,50E-05		4%
				1,89E-03	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			SO2 equivalente (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			1,89E-03		100%
				1,89E-03	100%

2.2 Eutrofización

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	PO4 equivalente parcial (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
NOx	2,58E-03	0,13	3,35E-04		100%
				3,35E-04	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			PO4 equivalente (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			3,35E-04		100%
				3,35E-04	100%

2.3 Contaminación de verano (Formación fotoquímica de ozono)

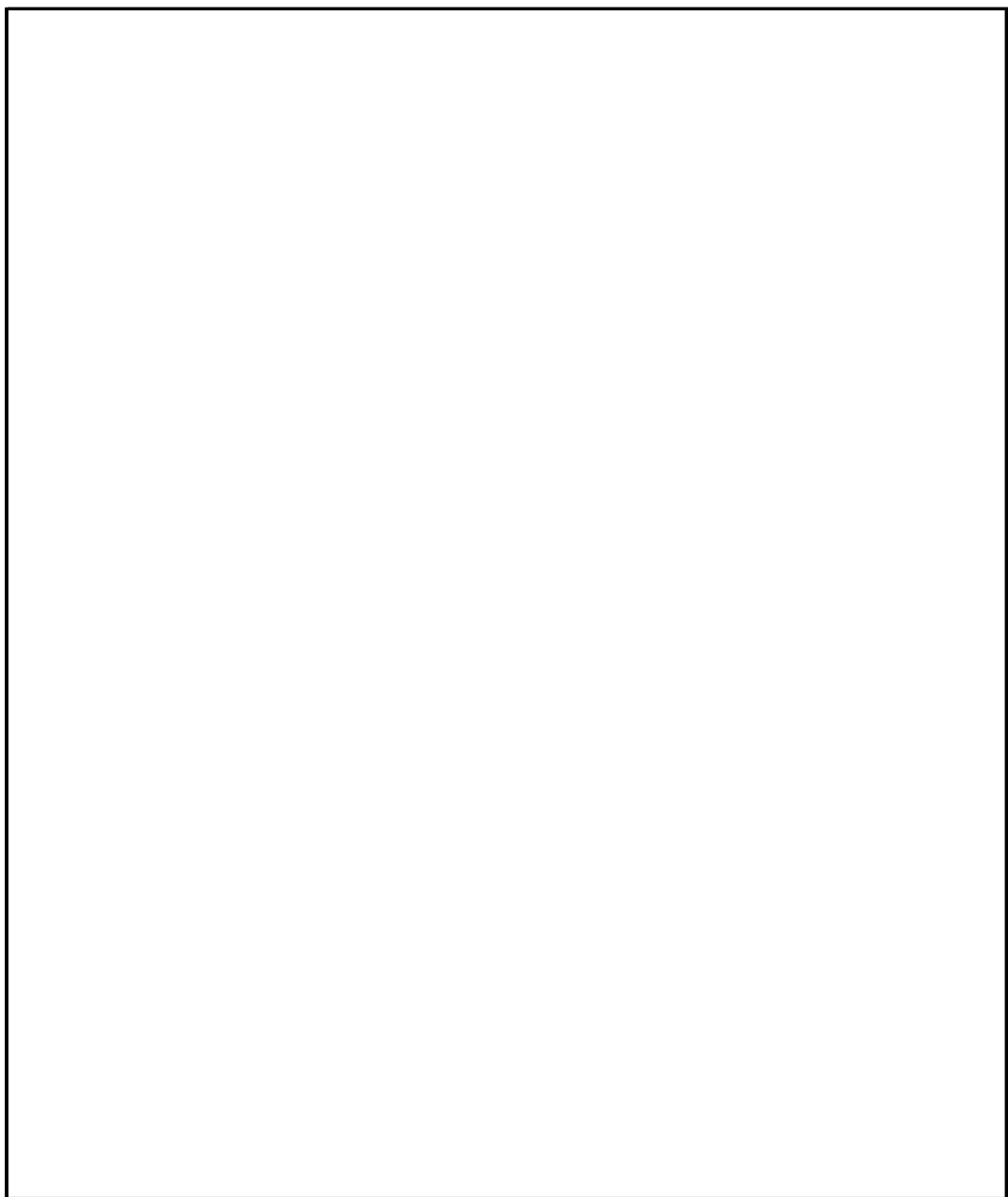
Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	C2H4 equivalente parcial (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)
VOC	3,00E-06	0,398	1,19E-06		100%
				1,19E-06	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			C2H4 equivalente (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			1,19E-06		100%
				1,19E-06	100%

Sistema	Portlandcement NL1	Caracterización	Hoja	03/03
----------------	---------------------------	------------------------	-------------	--------------

3. Impacto de Efecto Local

3.1 Contaminación de invierno (Contaminación del aire por partículas en suspensión)

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SPM equivalente parcial (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Polvo (SPM)	7,50E-03	1	7,50E-03		99%
SO2	8,50E-05	1	8,50E-05		1%
				7,59E-03	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			SPM equivalente (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			7,59E-03		100%
				7,59E-03	100%



Sistema	Producción de cemento	
Composición	Sistema de producción de cemento	
Origen	Inventarios - "Cembureau" -	País: Países Nórdicos
Nomenclatura original	Cement S	
Hoja de trabajo	1-3 Análisis del inventario - producción de cemento	
Fuente	Inventario disponible en Informe Cembureau	Hoja 01/03

Entradas - Material y Energía

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (materiales)	Cantidad de material (kg)	contribución (%)	Entrada (materiales)	Cantidad de material (kg)	contribución (%)
01. Caliza	1,36E+00	96%	09. Clinker*	9,54E-01	100%
02. Quartzito	4,61E-02	3%	10.		
03. Sulfato de hierro	9,20E-03	1%	11.		
04.			12.		
05.			13.		
06.			14. Suma	9,54E-01	100%
07.			15. Yeso	4,58E-02	
08. Suma	1,42E+00	100%	16. Rendimiento - clinker / material crudo (kg/kg)		67%
17. Clasificación (ENV 197-1): Tipo 1 - Portland cement			* estimado restando de 1 kg de cemento el yeso		

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (energías)	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)	Entrada (energías) (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)
18. Electricidad	n.e.		22. Electricidad	4,70E-01	10%
19. Energía térmica	n.e.		23. Energía térmica	4,07E+00	90%
20.			24.		
21. Suma			25. Suma	4,54E+00	100%
26. Rendimiento: material crudo / energía térmica 35%					

Salidas - Emisiones al aire

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Salidas	Cantidad (kg)	contribución (%)	Salidas (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad (kg)	contribución (%)
27.			52. Cd ^(L)	1,04E-08	0%
28.			53. CH ₄ ^{(G)(R)}	3,05E-04	0%
29.			54. CO	7,84E-04	0%
30.			55. CO ₂ ^(G)	8,05E-01	100%
31.			56. Cr ^(L)	1,70E-08	0%
32.			57. Cu ^(R)	2,57E-09	0%
33.			58. Fenol	4,23E-10	0%
34.			59. HC	1,60E-05	0%
35.			60. Hg ^(L)	3,49E-09	0%
36.			61. N ₂ O ^(G)	1,46E-10	0%
37.			62. NO _x ^(R)	1,94E-03	0%
38.			63. PAH's ^{(R)(L)}	3,36E-10	0%
39.			64. Pb ^(L)	8,68E-09	0%
40.			65. Polvo (SPM) ^(L)	1,62E-04	0%
41.			66. SO ₂ ^{(R)(L)}	4,51E-04	0%
42.			67. TI	1,04E-07	0%
43.			68. VOC ^(R)	1,29E-04	0%
44.			69. Zn	1,29E-08	0%
45.			70.		
46.			71.		
47.			72.		
48.			73.		
49.			74.		
50.			75.		
51. Suma			76. Suma	8,09E-01	100%

1. Emisiones causadoras de impacto ambiental con efecto global ^(G), Regional ^(R) y Local ^(L)
n.e. - No registrado

Sistema	Cement S	Caracterización	Hoja	02/03
----------------	-----------------	------------------------	-------------	--------------

1. Impacto de Efecto Global

1.1 Efecto Invernadero (Calentamiento Global)

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	CO2 equivalente parcial (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
CO2	8,05E-01	1	8,05E-01		100%
CH4	3,05E-04	11	3,36E-03		0%
N2O	1,46E-10	270	3,94E-08		0%
				8,08E-01	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			CO2 equivalente (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			8,08E-01		100%
				8,08E-01	100%

2. Impacto de Efecto Regional

2.1 Acidificación

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SO2 equivalente parcial (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
NOx	1,94E-03	0,70	1,36E-03		75%
SO2	4,51E-04	1	4,51E-04		25%
				1,81E-03	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			SO2 equivalente (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			1,81E-03		100%
				1,81E-03	100%

2.2 Eutrofización

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	PO4 equivalente parcial (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
NOx	1,94E-03	0,13	2,52E-04		100%
					2,52E-04
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			PO4 equivalente (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			2,52E-04		100%
				2,52E-04	100%

2.3 Contaminación de verano (Formación fotoquímica de ozono)

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	C2H4 equivalente parcial (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)
CH4	3,05E-04	0,007	2,14E-06		4%
PAH's	3,36E-10	0,761	2,56E-10		0%
Fenol	4,23E-10	0,761	3,22E-10		0%
VOC	1,29E-04	0,398	5,13E-05		96%
				5,35E-05	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			C2H4 equivalente (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			5,35E-05		100%
				5,35E-05	100%

Sistema	Cement S	Caracterización	Hoja	03/03
----------------	-----------------	------------------------	-------------	--------------

3. Impacto de Efecto Local

3.1 Contaminación de invierno (Contaminación del aire por partículas en suspensión)

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SPM equivalente parcial (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Polvo (SPM)	1,62E-04	1	1,62E-04		26%
SO2	4,51E-04	1	4,51E-04		74%
				6,13E-04	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			SPM equivalente (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			6,13E-04		100%
				6,13E-04	100%

3.2 Carcinógenos

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	B(a)P equivalente parcial (kg)	B(a)P equiv. total (kg)	contribución (%)
PAH's	3,36E-10	1	3,36E-10		100%
					3,36E-10
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			B(a)P equivalente (kg)	B(a)P equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			3,36E-10		100%
				3,36E-10	100%

3.3 Metales Pesados

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	Pb equivalente parcial (kg)	Pb equiv. total (kg)	contribución (%)
Cd	1,04E-08	50	5,20E-07		98%
Hg	3,49E-09	1	3,49E-09		1%
Pb	8,68E-09	1	8,68E-09		2%
				5,32E-07	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			Pb equivalente (kg)	Pb equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			5,32E-07		100%
				5,32E-07	100%

--

Sistema	Producción de Cemento		
Composición	Sistema de producción de cemento		
Origen	Inventarios - "Cembureau" -	País: Finlandia	
Nomenclatura original	Cement SF1		
Hojas de trabajo	1-3 Análisis del inventario - producción de cemento		
Fuente	Inventario disponible en Informe Cembureau	Hoja	01/03

Entradas - Material y Energía

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (materiales) (con respecto a la producción de 0,95 kg de clinker)	Cantidad de material (kg)	contribución (%)	Entrada (materiales) (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad de material (kg)	contribución (%)
01. Caliza	1,20E+00	100%	09. Clinker**	9,50E-01	100%
02.			10.		
03.			11.		
04.			12.		
05.			13.		
06.			14. Suma	9,50E-01	100%
07.			15. Yeso	5,00E-02	
08. Suma	1,20E+00	100%	16. Rendimiento - clinker / material crudo (kg/kg)		79%
17. Clasificación (ENV 197-1): Tipo I - Portland cement			** valores estimado con base en la ENV 197-1		

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (Energías)	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)	Entrada (Energías) (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)
18. Electricidad	n.e.		22. Electricidad	4,50E-01	8%
19. Energía térmica	n.e.		23. Energía térmica	4,90E+00	92%
20.			24.		
21. Suma			25. Suma	5,35E+00	100%
26. Rendimiento: material crudo / energía térmica		24%			

Salidas - Emisiones al aire y agua

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Salidas	Cantidad (kg)	contribución (%)	Salidas (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad (kg)	contribución (%)
27.			52. As ^(L)	2,30E-08	0%
28.			53. Benzeno ^{(R) (L)}	6,90E-09	0%
29.			54. Cd ^(L)	2,00E-09	0%
30.			55. CH4 ^{(G) (R)}	7,50E-04	0%
31.			56. CO	1,90E-03	0%
32.			57. CO2 ^(G)	7,80E-01	99%
33.			58. COD ^(R)	4,20E-07	0%
34.			59. Cr ^(L)	7,80E-09	0%
35.			60. Fenol ^(R)	2,10E-09	0%
36.			61. HC	1,30E-04	0%
37.			62. Hg ^(L)	9,20E-09	0%
38.			63. N2O ^(G)	2,10E-09	0%
39.			64. NOx ^(R)	3,70E-03	0%
40.			65. Ntot ^(R)	6,90E-10	0%
41.			66. PAH's ^{(R) (L)}	3,60E-09	0%
42.			67. Pb ^(L)	4,90E-10	0%
43.			68. Polvo (SPM) ^(L)	3,90E-04	0%
44.			69. SO2 ^{(R) (L)}	6,30E-04	0%
45.			70. TI	2,50E-10	0%
46.			71. VOC ^(R)	9,10E-04	0%
47.			72. Zn	1,80E-10	0%
48.			73.		
49.			74.		
50.			75.		
51. Suma			76. Suma	7,88E-01	100%

1. Emisiones causadoras de impacto ambiental con efecto global^(G), Regional^(R) y Local^(L)
n.e. - no estimado

Sistema	Cement SF1	Caracterización	Hoja	02/03
----------------	-------------------	------------------------	-------------	--------------

1. Impacto de Efecto Global

1.1 Efecto Invernadero (Calentamiento Global)

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	CO2 equivalente parcial (kg)	CO2 equiv. total (kg)	Participación contribución (%)
CO2	7,80E-01	1	7,80E-01		99%
CH4	7,50E-04	11	8,25E-03		1%
N2O	2,10E-09	270	5,67E-07		0%
				7,88E-01	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			CO2 equivalente (kg)	CO2 equiv. total (kg)	Participación contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			7,88E-01		100%
				7,88E-01	100%

2. Impacto de Efecto Regional

2.1 Acidificación

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SO2 equivalente parcial (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
NOx	3,70E-03	0,70	2,59E-03		80%
SO2	6,30E-04	1	6,30E-04		20%
				3,22E-03	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			SO2 equivalente (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			3,22E-03		100%
				3,22E-03	100%

2.2 Eutrofización

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	PO4 equivalente parcial (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
NOx	3,70E-03	0,13	4,81E-04		100%
					4,81E-04
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			PO4 equivalente (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			4,81E-04		100%
				4,81E-04	100%

2.3 Contaminación de verano (Formación fotoquímica de ozono)

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	C2H4 equivalente parcial (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Benceno	6,90E-09	0,189	1,30E-09		0%
CH4	7,50E-04	0,007	5,25E-06		1%
PAH's	3,60E-09	0,761	2,74E-09		0%
Fenol	2,10E-09	0,761	1,60E-09		0%
VOC	9,10E-04	0,398	3,62E-04		99%
				3,67E-04	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			C2H4 equivalente (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			3,67E-04		100%
				3,67E-04	100%

Sistema	Cement SF1	Caracterización	Hoja	03/03
----------------	-------------------	------------------------	-------------	--------------

3. Impacto de Efecto Local

3.1 Contaminación de invierno (Contaminación del aire por partículas en suspensión)

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SPM equivalente parcial (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Polvo (SPM)	3,90E-04	1	3,90E-04		38%
SO2	6,30E-04	1	6,30E-04		62%
					1,02E-03
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			SPM equivalente (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			1,02E-03		100%
				1,02E-03	100%

3.2 Carcinógenos

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	B(a)P equivalente parcial (kg)	B(a)P equiv. total (kg)	contribución (%)
As	2,30E-08	0,044	1,01E-09		
Benzeno	6,90E-09	0,000044	3,04E-13		0%
PAH's	3,60E-09	1	3,60E-09		78%
				4,61E-09	78%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			B(a)P equivalente (kg)	B(a)P equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			4,61E-09		100%
				4,61E-09	100%

3.3 Metales Pesados

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	Pb equivalente parcial (kg)	Pb equiv. total (kg)	contribución (%)
Cd	2,00E-09	50	1,00E-07		91%
Hg	9,20E-09	1	9,20E-09		8%
Pb	4,90E-10	1	4,90E-10		0%
				1,10E-07	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			Pb equivalente (kg)	Pb equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			1,10E-07		100%
				1,10E-07	100%

--

Sistema	Producción de cemento	
Composición	Subsistema de producción de clinker + subsistema de producción de cemento	
Origen	Inventarios - "Cembureau" -	País: Países Nórdicos
Nomenclatura original	Cement SF2	
Hoja de trabajo	1-4 Análisis del inventario - producción de cemento	
Fuente	Inventario disponible en Informe Cembureau	Hoja 01/04

Entradas - Material y Energía

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (materiales) (con respecto a la producción de 0,95 kg de clínquer)	Cantidad de material (kg)	contribución (%)	Entrada (materiales) (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad de material (kg)	contribución (%)
01. Caliza	1,55E+00	100%	09. Clinker**	9,50E-01	100%
02.			10.		
03.			11.		
04.			12.		
05.			13.		
06.			14. Suma	9,50E-01	100%
07.			15. Yeso	5,00E-02	
08. Suma	1,55E+00	100%	16. Rendimiento - clinker / material crudo (kg/kg)		61%
17. Clasificación (ENV 197-1): Tipo I - Portland cement			** valor estimado según la norma ENV 197-1		

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (energías) (con respecto a la producción de 0,95 kg de clínquer)	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)	Entrada (energías) (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)
18. Electricidad	1,36E-01	3%	22. Electricidad	1,89E-01	87%
19. Energía térmica	3,77E+00	97%	23. Energía térmica	2,87E-02	13%
20.			24.		
21. Suma	3,91E+00	100%	25. Suma	2,18E-01	100%
26. Rendimiento: material crudo / energía térmica		41%			

Salidas - Emisiones al aire y agua

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Salidas	Cantidad (kg)	contribución (%)	Salidas (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad (kg)	contribución (%)
26. As ^(L)	3,10E-09	0%	53. Benceno ^{(R)(L)}	6,00E-09	0%
27. Benceno ^{(R)(L)}	3,10E-09	0%	54. CH ₄ ^{(G)(R)}	3,10E-06	0%
28. Cd ^(L)	6,90E-09	0%	55. CO	3,40E-06	0%
29. CH ₄ ^{(G)(R)}	9,00E-04	0%	56. CO ₂ ^(G)	3,70E-03	90%
30. CO	3,10E-03	0%	57. COD ^(R)	3,00E-09	0%
31. CO ₂ ^(G)	8,09E-01	99%	58. Fenol ^(R)	1,30E-11	0%
32. COD ^(R)	2,20E-07	0%	59. HC	5,70E-06	0%
33. Co	8,00E-10	0%	60. N ₂ O ^(G)	3,00E-08	0%
34. Cr ^(L)	1,48E-08	0%	61. NO _x ^(R)	5,00E-05	1%
35. Cu	1,41E-08	0%	62. N-tot ^(R)	4,00E-10	0%
36. Fenol ^(R)	9,80E-10	0%	63. PAH's ^{(R)(L)}	2,00E-10	0%
37. HC	9,50E-05	0%	64. Polvo (SPM) ^(L)	3,29E-04	8%
38. Hg ^(L)	1,14E-08	0%	65. SO ₂ ^{(R)(L)}	3,00E-05	1%
39. Mn	4,80E-09	0%	66.		
40. N ₂ O ^(G)	3,00E-08	0%	67.		
41. NH ₄	1,90E-06	0%	68.		
42. Ni	1,27E-08	0%	69.		
43. NO _x ^(R)	2,90E-03	0%	70.		
44. N-tot ^(R)	3,30E-08	0%	71.		
45. PAH's ^{(R)(L)}	1,00E-09	0%	72.		
46. Pb ^(L)	1,46E-08	0%	73.		
47. Polvo (SPM) ^(L)	3,27E-04	0%	74.		
48. SO ₂ ^{(R)(L)}	1,30E-03	0%	75.		
49. Sn	4,00E-10	0%	76.		
50. Tl	4,24E-08	0%	77.		
51. Zn	9,30E-08	0%	78.		
52. V	1,60E-09	0%	79.		
53. Suma	8,18E-01	100%	80. Suma	4,12E-03	100%

1. Emisiones causadoras de impacto ambiental con efecto Global(G), Regional(R) y Local(L)

Sistema	Cement SF2	Caracterización	Hoja	02/04
----------------	-------------------	------------------------	-------------	--------------

1. Impacto de Efecto Global

1.1 Efecto Invernadero (Calentamiento Global)

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	CO2 equivalente parcial (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
CO2	8,09E-01	1	8,09E-01		1%
CH4	9,00E-04	11	9,90E-03		99%
N2O	3,00E-08	270	8,10E-06		0%
				8,19E-01	100%
Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	CO2 equivalente parcial (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
CO2	3,70E-03	1	3,70E-03		1%
CH4	3,10E-06	11	3,41E-05		99%
N2O	3,00E-08	270	8,10E-06		0%
				3,74E-03	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			CO2 equivalente (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER			8,19E-01		100%
Subsistema de producción de CEMENTO			3,74E-03		0%
			8,23E-01	100%	

2. Impacto de Efecto Regional

2.1 Acidificación

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SO2 equivalente parcial (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
NOx	2,90E-03	0,70	2,03E-03		61%
SO2	1,30E-03	1	1,30E-03		39%
				3,33E-03	100%
Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SO2 equivalente parcial (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
NOx	5,00E-05	0,70	3,50E-05		54%
SO2	3,00E-05	1	3,00E-05		46%
				6,50E-05	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			SO2 equivalente (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER			3,33E-03		98%
Subsistema de producción de CEMENTO			6,50E-05		2%
			3,40E-03	100%	

2.2 Eutrofización

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	PO4 equivalente parcial (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
NOx	2,90E-03	0,13	3,77E-04		100%
					3,77E-04
Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	PO4 equivalente parcial (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
NOx	5,00E-05	0,13	6,50E-06		100%
					6,50E-06

Sistema	Cement SF2	Caracterización	Hoja	03/04
Sistema: Producción de CEMENTO				
Subsistemas		SO2 equivalente (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER		3,77E-04		98%
Subsistema de producción de CEMENTO		6,50E-06		2%
			3,84E-04	100%

2.3 Contaminación de verano (Formación fotoquímica de ozono)

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	C2H4 equivalente parcial (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Benceno	3,10E-09	0,189	5,86E-10		0%
CH4	9,00E-04	0,007	6,30E-06		100%
Fenol	9,80E-10	0,761	7,46E-10		0%
PAH's	1,00E-09	0,761	7,61E-10		0%
				6,30E-06	100%
Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	C2H4 equivalente parcial (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Benceno	6,00E-09	0,189	1,13E-09		5%
CH4	3,10E-06	0,007	2,17E-08		94%
Fenol	1,30E-11	0,761	9,89E-12		0%
PAH's	2,00E-10	0,761	1,52E-10		1%
				2,30E-08	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			C2H4 equivalente (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER			6,30E-06		100%
Subsistema de producción de CEMENTO			2,30E-08		0%
				6,33E-06	100%

3. Impacto de Efecto Local

3.1 Contaminación de invierno (Contaminación del aire por partículas en suspensión)

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SPM equivalente parcial (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Polvo (SPM)	3,20E-04	1	3,20E-04		20%
SO2	1,30E-03	1	1,30E-03		80%
				1,62E-03	100%
Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SPM equivalente parcial (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Polvo (SPM)	8,00E-06	1	8,00E-06		21%
SO2	3,00E-05	1	3,00E-05		79%
				3,80E-05	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			SPM equivalente (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER			1,62E-03		98%
Subsistema de producción de CEMENTO			3,80E-05		2%
				1,66E-03	100%

Sistema	Cement SF2	Caracterización	Hoja	04/04
----------------	-------------------	------------------------	-------------	--------------

3.2 Carcinógenos

Subsistema: Producción de CLINKER

Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	B(a)P equivalente parcial (kg)	B(a)P equiv. total (kg)	contribución (%)
As	3,10E-09	0,044	1,36E-10		11%
Benceno	3,10E-09	0,000044	1,36E-13		0%
Ni	1,27E-08	0,0044	5,59E-11		5%
PAH's	1,00E-09	1	1,00E-09		84%
				1,19E-09	100%

Subsistema: Producción de CEMENTO

Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	B(a)P equivalente parcial (kg)	B(a)P equiv. total (kg)	contribución (%)
Benceno	6,00E-09	0,000044	2,64E-13		0%
PAH's	2,00E-10	1	2,00E-10		100%
				2,00E-10	100%

Sistema: Producción de CEMENTO

Subsistemas	B(a)P equivalente (kg)	B(a)P equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER	1,19E-09		86%
Subsistema de producción de CEMENTO	2,00E-10		14%
		1,39E-09	100%

3.3 Metales Pesados

Subsistema: Producción de CLINKER

Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	Pb equivalente parcial (kg)	Pb equiv. total (kg)	contribución (%)
Cd	6,90E-09	50	3,45E-07		92%
Hg	1,14E-08	1	1,14E-08		3%
Mn	4,80E-09	1	4,80E-09		1%
Pb	1,46E-08	1	1,46E-08		4%
				3,76E-07	100%

Subsistema: Producción de CEMENTO

Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	Pb equivalente parcial (kg)	Pb equiv. total (kg)	contribución (%)
n.e.					
					0,00E+00

Sistema: Producción de CEMENTO

Subsistemas	Pb equivalente (kg)	Pb equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER	3,76E-07		100%
Subsistema de producción de CEMENTO	0,00E+00		0%
		3,76E-07	100%



Sistema	Producción de cemento	
Composición	Subsistema de producción de clinker + subsistema de producción de cemento	
Origen	Inventarios del "SimaPro 4.0"	País: Holanda
Nomenclatura original	Portlandcement production	
Hoja	1-4 Analisis del inventario - producción de cemento	
Fuente	SimaPro 4.0 - PRé Consultants, 1997	Hoja 01/03

Entradas - Material y Energía

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (materiales) (con respecto a la producción de 0,95 kg de clinker)	Cantidad de material (kg)	contribución (%)	Entrada (materiales) (con relación a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad de material (kg)	contribución (%)
01. Marga	1,61E+00	93%	09. Clinker	9,50E-01	83%
02. Minerales de arcilla	5,70E-02	3%	10. Escorias	1,09E-01	9%
03. Pizarra	4,75E-02	3%	11. Cenizas	9,00E-02	8%
04. Óxidos férricos	1,90E-02	1%	12.		
05.			13.		
06.			14. Suma	1,15E+00	100%
07.			15. Yeso	5,00E-02	
08. Suma	1,73E+00	100%	16. Rendimiento - clinker / material crudo (kg/kg)		55%
17. Clasificación (ENV 197-1): Tipo II / A-S - Portland slag cement					

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (energías) (con respecto a la producción de 0,95 kg de clinker)	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)	Entrada (energías) (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)
18. Electricidad	1,34E-01	4%	22. Electricidad	1,46E-01	82%
19. Energía térmica	3,38E+00	96%	23. Energía térmica	3,19E-02	18%
20.			24.		
21. Suma	3,51E+00	100%	25. Suma	1,78E-01	100%
26. Rendimiento: material crudo / energía térmica 51%					

Salidas - Emisiones al aire

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Salidas (con respecto a la producción de 0,95 kg de clinker)	Cantidad (kg)	contribución (%)	Salidas (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad (kg)	contribución (%)
27. Aldehído ^{(1) (L)}	4,20E-08	0%	49. Aldehído ^{(1) (L)}	4,57E-08	0%
28. Amonia ^{(1) (R)}	9,21E-08	0%	50. Amonia ^{(1) (R)}	1,05E-07	0%
29. CO ⁽³⁾	4,83E-04	0%	51. CO ⁽³⁾	1,90E-05	0%
30. CO2 ^{(3) (G)}	8,92E-01	99%	52. CO2 ^{(3) (G)}	2,63E-02	98%
31. CxHy ^{(1) (R)}	2,09E-04	0%	53. CxHy ^{(1) (R)}	2,27E-04	1%
32. HF ⁽¹⁾	4,24E-11	0%	54. HF ⁽¹⁾	4,62E-11	0%
33. N2O ^{(1) (G)}	3,26E-06	0%	55. N2O ^{(1) (G)}	3,55E-06	0%
34. NOx ^{(3) (R)}	3,02E-03	0%	56. NOx ^{(3) (R)}	8,01E-05	0%
35. Polvo (SPM) ^{(3) (L)}	2,38E-04	0%	57. Polvo (SPM) ^{(3) (L)}	5,55E-06	0%
36. SO2 ^{(1) (R) (L)}	7,20E-05	0%	58. SO2 ^{(1) (R) (L)}	7,85E-05	0%
37. SOx ^{(2) (L) (R)}	1,01E-03	0%	59.		
38.			60.		
39.			61.		
40.			62.		
41.			63.		
42.			64.		
43.			65.		
44.			66.		
45.			67.		
46.			68.		
47.			69.		
48. Suma	8,97E-01	100%	70. Suma	2,67E-02	100%

(1) Emisión procedente exclusivamente de la producción de energía.
 (2) Emisión procedente exclusivamente de los procesos en la planta de producción de cemento
 (3) Emisión procedente de ambas fuentes (energía; planta de producción de cemento)
 Emisiones causadoras de impacto ambiental de efecto global ^(G), Regional ^(R) y Local ^(L)

Sistema	Portland cement	Caracterización	Hoja	02/03
----------------	------------------------	------------------------	-------------	--------------

1. Impacto de Efecto Global

1.1 Efecto Invernadero (Calentamiento Global)

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	CO2 equivalente parcial (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
CO2	8,92E-01	1	8,92E-01		100%
N2O	3,26E-06	270	8,80E-04		0%
					8,93E-01
Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	CO2 equivalente parcial (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
CO2	2,63E-02	1	2,63E-02		96%
N2O	3,55E-06	270	9,59E-04		4%
					2,73E-02
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			CO2 equivalente (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER			8,93E-01		97%
Subsistema de producción de CEMENTO			2,73E-02		3%
				9,20E-01	100%

2. Impacto de Efecto Regional

2.1 Acidificación

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SO2 equivalente parcial (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Amonia	9,21E-08	1,88	1,73E-07		0%
HF	4,24E-11	1,60	6,78E-11		0%
NOx	3,02E-03	0,70	2,11E-03		66%
SO2	7,20E-05	1	7,20E-05		2%
SOx	1,01E-03	1	1,01E-03		32%
					3,20E-03
Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SO2 equivalente parcial (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Amonia	1,05E-07	1,88	1,97E-07		0%
HF	4,62E-11	1,60	7,39E-11		0%
NOx	8,01E-05	0,70	5,61E-05		42%
SO2	7,85E-05	1	7,85E-05		58%
					1,35E-04
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			SO2 equivalente (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER			3,20E-03		96%
Subsistema de producción de CEMENTO			1,35E-04		4%
				3,33E-03	100%

2.2 Eutrofización

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	PO4 equivalente parcial (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Amonia	9,21E-08	0,33	3,04E-08		0%
NOx	3,02E-03	0,13	3,93E-04		100%
				3,93E-04	100%

Sistema		Portland cement		Caracterización		Hoja		03/03	
Subsistema: Producción de CEMENTO									
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	PO4 equivalente parcial (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)				
Amonia	1,05E-07	0,33	3,47E-08		0%				
NOx	8,01E-05	0,13	1,04E-05		100%				
				1,04E-05	100%				
Sistema: Producción de CEMENTO									
Subsistemas	PO4 equivalente (kg)			PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)				
Subsistema de producción de CLINKER	3,93E-04				97%				
Subsistema de producción de CEMENTO	1,04E-05				3%				
				4,03E-04	100%				

2.3 Contaminación de verano (Formación fotoquímica de ozono)

Subsistema: Producción de CLINKER						
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	C2H4 equivalente parcial (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)	
Aldehido	4,20E-08	0,443	1,86E-08		0%	
CxHy	2,09E-04	0,398	8,32E-05		100%	
				8,32E-05	100%	
Subsistema: Producción de CEMENTO						
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	C2H4 equivalente parcial (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)	
Aldehido	4,57E-08	0,443	2,02E-08		0%	
CxHy	2,27E-04	0,398	9,03E-05		100%	
				9,04E-05	100%	
Sistema: Producción de CEMENTO						
Subsistemas	C2H4 equivalente (kg)			C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)	
Subsistema de producción de CLINKER	8,32E-05				48%	
Subsistema de producción de CEMENTO	9,04E-05				52%	
				1,74E-04	100%	

3. Impacto de Efecto Local

3.1 Contaminación de invierno (Contaminación del aire por partículas en suspensión)

Subsistema: Producción de CLINKER						
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SPM equivalente parcial (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)	
Polvo (SPM)	2,38E-04	1	2,38E-04		18%	
SO2	7,20E-05	1	7,20E-05		5%	
SOx	1,01E-03	1	1,01E-03		77%	
				1,32E-03	100%	
Subsistema: Producción de CEMENTO						
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SPM equivalente parcial (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)	
Polvo (SPM)	5,55E-06	1	5,55E-06		7%	
SO2	7,85E-05	1	7,85E-05		93%	
				8,41E-05	100%	
Sistema: Producción de CEMENTO						
Subsistemas	SPM equivalente (kg)			SPM equiv. total (kg)	contribución (%)	
Subsistema de producción de CLINKER	1,32E-03				94%	
Subsistema de producción de CEMENTO	8,41E-05				6%	
				1,40E-03	100%	

Sistema	Producción de cemento	
Composición	Sistema de producción de cemento	
Origen	Inventarios - "Cembureau" -	País: Austria
Nomenclatura original	Portlandcement A	
Hoja de trabajo	1-3 Análisis del inventario - producción de cemento	
Fuente	Inventario disponible en Informe Cembureau	Hoja 01/03

Entradas - Material y Energía

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (materiales) (con respecto a 0,78 kg de clinker)	Cantidad de material (kg)	contribución (%)	Entrada (materiales) (con respecto a 1 kg de cemento)	Cantidad de material (kg)	contribución (%)
01. Caliza	1,20E+00	99%	09. Clinker*	7,87E-01	84%
02. Otros materiales	1,69E-02	1%	10. Escorias	1,22E-01	13%
03.			11. Cenizas	2,72E-02	3%
04.			12.		
05.			13.		
06.			14. Suma	9,36E-01	100%
07.			15. Yeso	6,43E-02	
08. Suma	1,21E+00	100%	16. Rendimiento - clinker / material crudo (kg/kg)		65%
17. Clasificación (ENV 197-1): Tipo II / A-S - Portland slag cement			*valor estimado restado de 1 kg las adiciones + yeso		

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (energías)	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)	Entrada (energías) (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)
18. Electricidad	n.e.		22. Electricidad	3,82E-01	12%
19. Energía térmica	n.e.		23. Energía térmica	2,81E+00	88%
20.			24.		
21. Suma			25. Suma	3,19E+00	100%
26. Rendimiento: material crudo / energía térmica 43%					

Salidas - Emisiones al aire

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Salidas	Cantidad (kg)	contribución (%)	Salidas (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad (kg)	contribución (%)
27.			52. As ^(L)	3,20E-09	0%
28.			53. Be	2,00E-10	0%
29.			54. Cd ^(L)	2,00E-09	0%
30.			55. CO	9,28E-04	0%
31.			56. CO ₂ ^(G)	5,86E-01	99%
32.			57. Co	1,40E-09	0%
33.			58. Hg ^(L)	1,50E-08	0%
34.			59. Ni ^(L)	1,30E-09	0%
35.			60. NOx ^(R)	1,57E-03	0%
36.			61. Pb ^(L)	3,70E-09	0%
37.			62. Polvo (SPM) ^(L)	1,71E-04	0%
38.			63. SO ₂ ^{(R)(L)}	1,19E-04	0%
39.			64. Tl	7,40E-09	0%
40.			65. VOC ^(R)	2,40E-04	0%
41.			66.		
42.			67.		
43.			68.		
44.			69.		
45.			70.		
46.			71.		
47.			72.		
48.			73.		
49.			74.		
50.			75.		
51. Suma			76. Suma	5,89E-01	100%

1. Emisiones causadoras de impacto ambiental con efecto Global^(G), Regional^(R) y Local^(L)
n.e. - no estimado

Sistema	Portlandcement A	Caracterización	Hoja	02/03
----------------	-------------------------	------------------------	-------------	--------------

1. Impacto de Efecto Global

1.1 Efecto Invernadero (Calentamiento Global)

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	CO2 equivalente parcial (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
CO2	5,86E-01	1	5,86E-01		100%
				5,86E-01	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			CO2 equivalente (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			5,86E-01		100%
				5,86E-01	100%

2. Impacto de Efecto Regional

2.1 Acidificación

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SO2 equivalente parcial (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
NOx	1,57E-03	0,70	1,10E-03		90%
SO2	1,19E-04	1	1,19E-04		10%
				1,22E-03	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			SO2 equivalente (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			1,22E-03		100%
				1,22E-03	100%

2.2 Eutrofización

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	PO4 equivalente parcial (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
NOx	1,57E-03	0,13	2,04E-04		100%
				2,04E-04	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			PO4 equivalente (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			2,04E-04		100%
				2,04E-04	100%

2.3 Contaminación de verano (Formación fotoquímica de ozono)

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	C2H4 equivalente parcial (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)
VOC	2,40E-04	0,398	9,55E-05		100%
				9,55E-05	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			C2H4 equivalente (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			9,55E-05		100%
				9,55E-05	100%

Sistema	Portlandcement A	Caracterización	Hoja	03/03
----------------	-------------------------	------------------------	-------------	--------------

3. Impacto de Efecto Local

3.1 Contaminación de invierno (Contaminación del aire por partículas en suspensión)

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SPM equivalente parcial (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Polvo (SPM)	1,71E-04	1	1,71E-04		59%
SO ₂	1,19E-04	1	1,19E-04		41%
				2,90E-04	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			SPM equivalente (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			2,90E-04		100%
				2,90E-04	100%

3.2 Carcinógenos

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	B(a)P equivalente parcial (kg)	B(a)P equiv. total (kg)	contribución (%)
As	3,20E-09	0,044	1,41E-10		96%
Ni	1,30E-09	0,0044	5,72E-12		4%
				1,47E-10	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			B(a)P equivalente (kg)	B(a)P equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			1,47E-10		100%
				1,47E-10	100%

3.3 Metales Pesados

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	Pb equivalente parcial (kg)	Pb equiv. total (kg)	contribución (%)
Cd	2,00E-09	50	1,00E-07		84%
Hg	1,50E-08	1	1,50E-08		13%
Pb	3,70E-09	1	3,70E-09		3%
				1,19E-07	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			Pb equivalente (kg)	Pb equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			1,19E-07		100%
				1,19E-07	100%

--

Sistema	Producción de Cemento	
Composición	Sistema de producción de cemento	
Origen	Inventarios - "Cembureau" -	País: Holanda
Nomenclatura original	Portlandcement NL2	
Hoja de trabajo	1-3 Análisis del inventario - producción de cemento	
Fuente	Inventario disponible en Informe Cembureau	Hoja 01/03

Entradas - Material y Energía

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (materiales) (con respecto a la producción de 0,78 kg de clinker)	Cantidad de material (kg)	contribución (%)	Entrada (materiales) (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad de material (kg)	contribución (%)
01. Marga	1,09E+00	91%	09. Clinker*	7,79E-01	82%
02. Minerales de arcilla	2,85E-02	2%	10. Escorias	9,50E-02	10%
03. Oxidos ferricos	1,90E-02	2%	11. Cenizas	7,60E-02	8%
04. Pizarra	6,65E-02	6%	12.		
05.			13.		
06.			14. Suma	9,50E-01	100%
07.			15. Yeso	5,00E-02	
08. Suma	1,20E+00	100%	16. Rendimiento - clinker / material crudo (kg/kg)		65%
17. Clasificación (ENV 197-1): Tipo II-A / S- Portland slag cement			*valor estimado restando de 1 kg la cantidad de adiciones + yeso		

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (energías)	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)	Entrada (Energías) (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)
18. Electricidad	n.e.		22. Electricidad	1,16E-01	4%
19. Energía térmica	n.e.		23. Energía térmica	2,64E+00	96%
20.			24.		
21. Suma			25. Suma	2,75E+00	100%
26. Rendimiento: material crudo / energía térmica		46%			

Salidas - Emisiones al aire

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Salidas	Cantidad (kg)	contribución (%)	Salidas (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad (kg)	contribución (%)
27.			52. CO	5,01E-04	0%
28.			53. CO ₂ ^(G)	8,07E-01	100%
29.			54. F	4,99E-08	0%
30.			55. Metales pesados ^(L)	1,25E-08	0%
31.			56. NOx ^(R)	2,95E-03	0%
32.			57. Polvo (SPM) ^(L)	1,87E-04	0%
33.			58. SO ₂ ^{(R)(L)}	9,10E-05	0%
34.			59.		
35.			60.		
36.			61.		
37.			62.		
38.			63.		
39.			64.		
40.			65.		
41.			66.		
42.			67.		
43.			68.		
44.			69.		
45.			70.		
46.			71.		
47.			72.		
48.			73.		
49.			74.		
50.			75.		
51. Suma			76. Suma	8,11E-01	100%

1. Emisiones causadoras de impacto ambiental con efecto Global^(G), Regional^(R) y Local^(L)
n.e. - no estimado

Sistema	Portlandcement NL2	Caracterización	Hoja	02/03
----------------	---------------------------	------------------------	-------------	--------------

1. Impacto de Efecto Global

1.1 Efecto Invernadero (Calentamiento Global)

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	CO2 equivalente parcial (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
CO2	8,07E-01	1	8,07E-01		100%
				8,07E-01	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			CO2 equivalente (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			8,07E-01		100%
				8,07E-01	100%

2. Impacto de Efecto Regional

2.1 Acidificación

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SO2 equivalente parcial (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
NOx	2,95E-03	0,70	2,07E-03		96%
SO2	9,10E-05	1	9,10E-05		4%
				2,16E-03	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			SO2 equivalente (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			2,16E-03		100%
				2,16E-03	100%

2.2 Eutrofización

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	PO4 equivalente parcial (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
NOx	2,95E-03	0,13	3,84E-04		100%
				3,84E-04	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			PO4 equivalente (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			3,84E-04		100%
				3,84E-04	100%

3. Impacto de Efecto Local

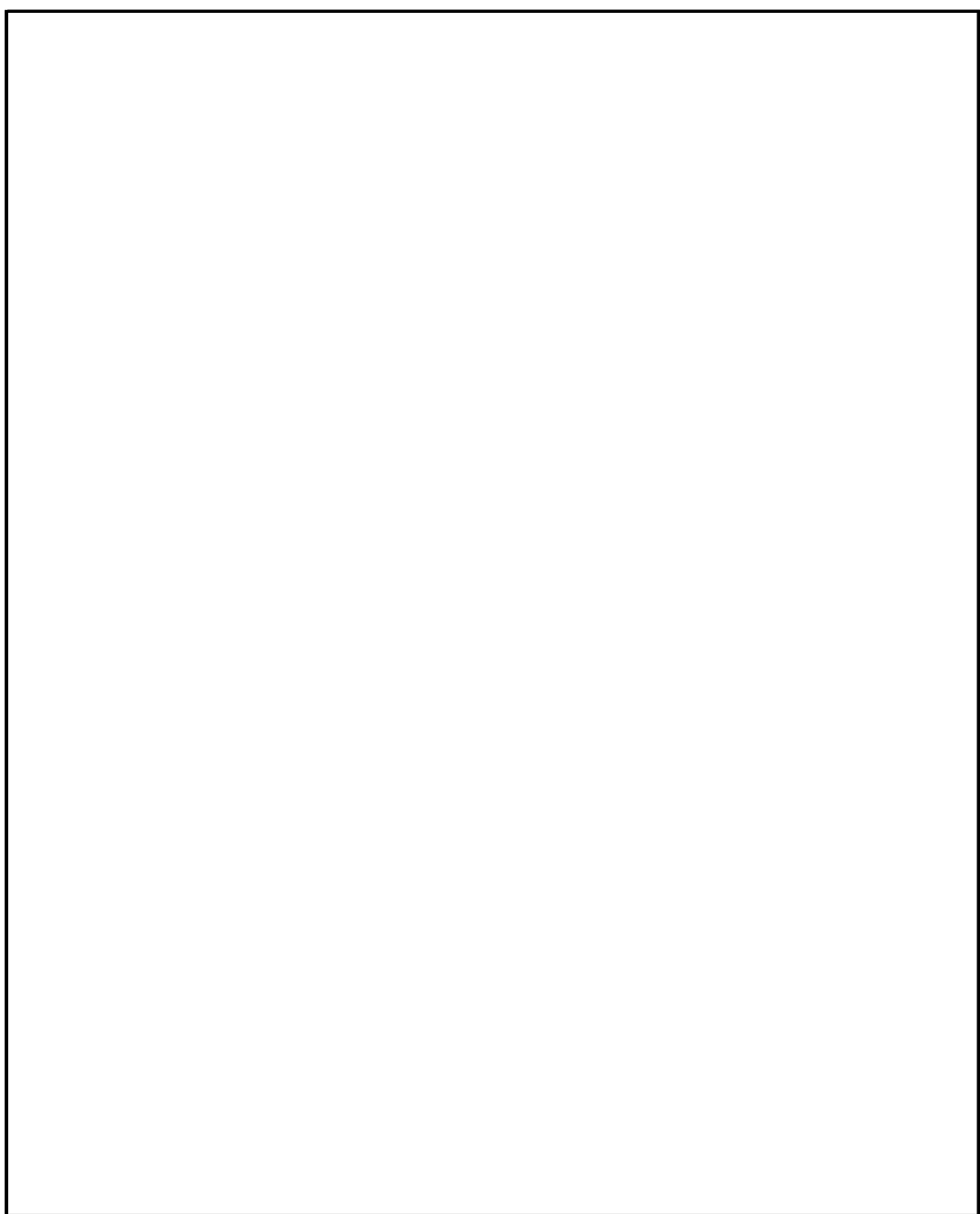
3.1 Contaminación de invierno (Contaminación del aire por partículas en suspensión)

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SPM equivalente parcial (kg)	SPM equiv. total (kg)	Participación contribución (%)
Polvo (SPM)	1,87E-04	1	1,87E-04		67%
SO2	9,10E-05	1	9,10E-05		33%
				2,78E-04	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			SPM equivalente (kg)	SPM equiv. total (kg)	Participación contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			2,78E-04		100%
				2,78E-04	100%

Sistema	Portlandcement NL2	Caracterización	Hoja	03/03
----------------	---------------------------	------------------------	-------------	--------------

3.2 Metales pesados

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	Pb equivalente parcial (kg)	Pb equiv. total (kg)	contribución (%)
Metales pesados	1,25E-08	1	1,25E-08		100%
				1,25E-08	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			Pb equivalente (kg)	Pb equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			1,25E-08		100%
				1,25E-08	100%



Sistema	Producción de Cemento	
Composición	Sistema de producción de cemento	
Origen	Inventarios - "Cembureau" -	País: Holanda
Nomenclatura original	Portlandcement NL3	
Hoja de trabajo	1-3 Análisis del inventario - producción de cemento	
Fuente	Inventario disponible en Informe Cembureau	Hoja 01/03

Entradas - Material y Energía

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (materiales) <small>(con respecto a la producción de 0,74 kg de clinker)</small>	Cantidad de material (kg)	contribución (%)	Entrada (materiales) <small>(con respecto a la producción de 1 kg de cemento)</small>	Cantidad de material (kg)	contribución (%)
01. Marga	1,31E+00	92%	09. Clinker*	7,43E-01	79%
02. Minerales de arcilla	5,64E-02	4%	10. Escorias	1,08E-01	11%
03. Óxidos ferricos	1,41E-02	1%	11. Cenizas	8,93E-02	9%
04. Pizarra	4,70E-02	3%	12.		
05.			13.		
06.			14. Suma	9,40E-01	100%
07.			15. Yeso	5,99E-02	
08. Suma	1,43E+00	100%	16. Rendimiento - clinker / material crudo (kg/kg)		52%
17. Clasificación (ENV 197-1): Tipo II / B-S - Portland slag cement			*valor estimado restando de 1 kg la cantidad de adiciones + yeso		

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (energías)	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)	Entrada (energías) <small>(con relación a la producción de 1 kg de cemento)</small>	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)
18. Electricidad	n.e.		22. Electricidad	3,18E-01	9%
19. Energía térmica	n.e.		23. Energía térmica	3,38E+00	91%
20.			24.		
21. Suma			25. Suma	3,70E+00	100%
26. Rendimiento: material crudo / energía térmica		42%			

Salidas - Emisiones al aire

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Salidas	Cantidad (kg)	contribución (%)	Salidas <small>(con respecto a la producción de 1 kg de cemento)</small>	Cantidad (kg)	contribución (%)
27.			52. CO	8,75E-05	0%
28.			53. CO ₂ ^(G)	2,89E-01	78%
29.			54. NO _x ^(R)	7,06E-04	0%
30.			55. Polvo (SPM) ^(L)	7,96E-02	21%
31.			56. SO ₂ ^{(R)(L)}	9,75E-04	0%
32.			57. VOC ^(R)	2,18E-05	0%
33.			58.		
34.			59.		
35.			60.		
36.			61.		
37.			62.		
38.			63.		
39.			64.		
40.			65.		
41.			66.		
42.			67.		
43.			68.		
44.			69.		
45.			70.		
46.			71.		
47.			72.		
48.			73.		
49.			74.		
50.			75.		
51. Suma			76. Suma	3,70E-01	100%

1. Emisiones causadoras de impacto ambiental con efecto Global^(G), Regional^(R) y Local^(L)
n.e. - no estimado

Sistema	Portlandcement NL3	Caracterización	Hoja	02/03
----------------	---------------------------	------------------------	-------------	--------------

1. Impacto de Efecto Global

1.1 Efecto Invernadero (Calentamiento Global)

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	CO2 equivalente parcial (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
CO2	2,89E-01	1	2,89E-01		100%
				2,89E-01	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			CO2 equivalente (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			2,89E-01		100%
				2,89E-01	100%

2. Impacto de Efecto Regional

2.1 Acidificación

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SO2 equivalente parcial (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
NOx	7,06E-04	0,70	4,94E-04		34%
SO2	9,75E-04	1	9,75E-04		66%
				1,47E-03	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			SO2 equivalente (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			1,47E-03		100%
				1,47E-03	100%

2.2 Eutrofización

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	PO4 equivalente parcial (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
NOx	7,06E-04	0,13	9,18E-05		100%
				9,18E-05	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			PO4 equivalente (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			9,18E-05		100%
				9,18E-05	100%

2.3 Contaminación de verano (Formación fotoquímica de ozono)

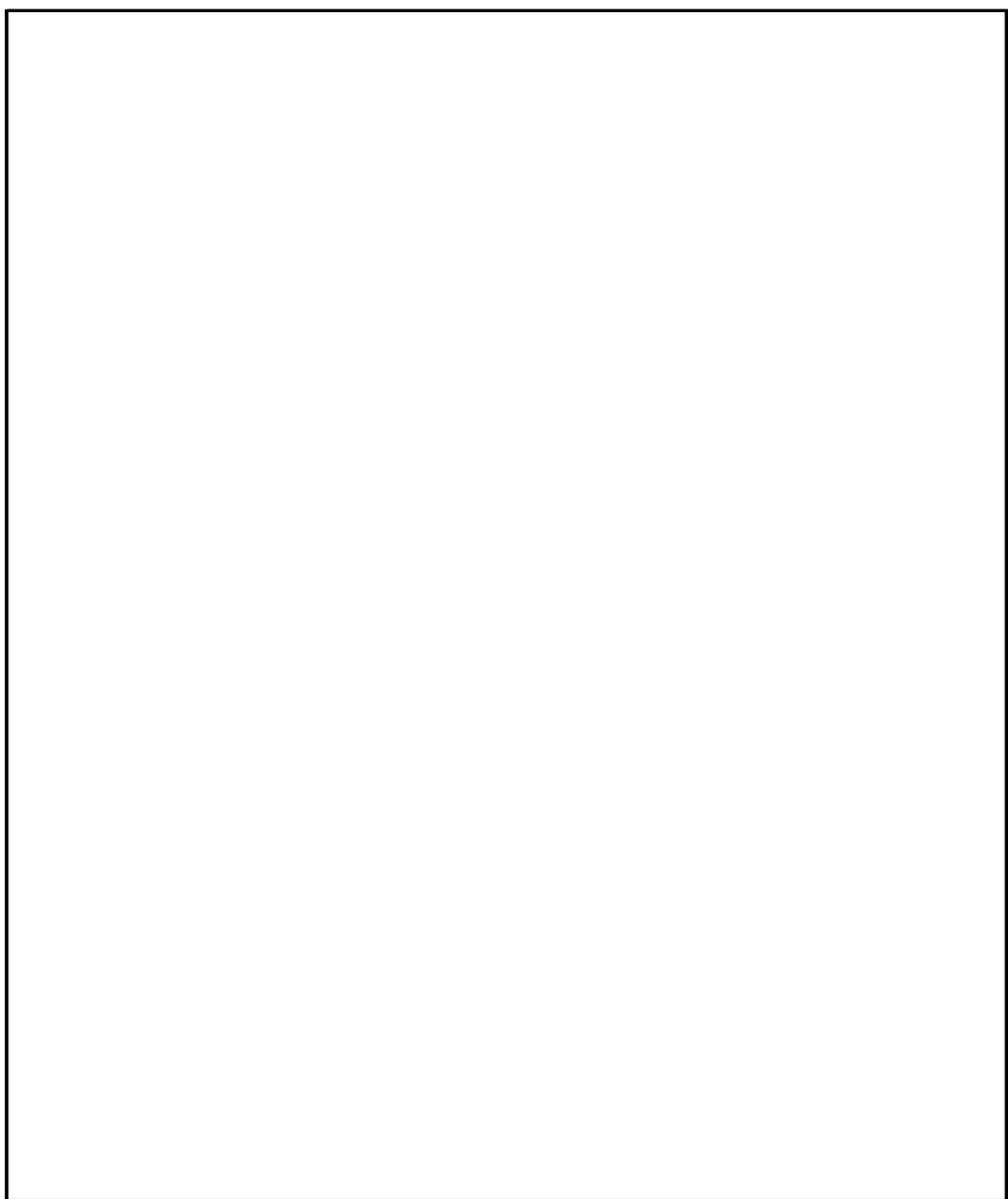
Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	C2H4 equivalente parcial (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	Participación contribución (%)
VOC	2,18E-05	0,398	8,68E-06		100%
				8,68E-06	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			C2H4 equivalente (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	Participación contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			8,68E-06		100%
				8,68E-06	100%

Sistema	Portlandcement NL3	Caracterización	Hoja	03/03
----------------	---------------------------	------------------------	-------------	--------------

3. Impacto de Efecto Local

3.1 Contaminación de invierno (Contaminación del aire por partículas en suspensión)

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SPM equivalente parcial (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Polvo (SPM)	7,96E-02	1	7,96E-02		99%
SO2	9,75E-04	1	9,75E-04		1%
				8,06E-02	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			SPM equivalente (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			8,06E-02		100%
				8,06E-02	100%



Sistema	Producción de Cemento	
Composición	Subsistema de producción de clinker + subsistema de producción de cemento	
Origen	Inventarios del "SimaPro 4.0"	País: Holanda
Nomenclatura original	Cement Hoogoven I	
Hojas	1-5 Análisis del inventario - producción de cemento	
Fuente	SimaPro 4.0 - PréConsultants, 1997	Hoja 01/04

Entradas - Material y Energía

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (materiales) (con respecto a la producción de 0,3 kg de clinker)	Cantidad de materiales (kg)	contribución (%)	Entrada (materiales) (con respecto a la producción de 1kg de cemento)	Cantidad de materiales (kg)	contribución (%)
01. Marga	5,10E-01	89%	09. Clinker	3,00E-01	32%
02. Adiciones	6,60E-02	11%	10. Escorias Hoogoven I	6,40E-01	68%
03.			11.		
04.			12.		
05.			13.		
06.			14. Suma	9,40E-01	100%
07.			15. Yeso	6,00E-02	
08. Suma	5,76E-01	100%	16. Rendimiento - clinker / material crudo (kg/kg)		52%
17. Clasificación (ENV 197-1): Tipo III / B - Blastfurnace cement					

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (energías) (con respecto a la producción de 0,3 kg de clinker)	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)	Entrada (energías) (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)
18. Electricidad	6,26E-02	5%	22. Electricidad	2,92E-01	21%
19. Energía térmica	1,08E+00	95%	23. Energía térmica	1,08E+00	79%
20.			24.		
21. Suma	1,14E+00	100%	25. Suma	1,37E+00	100%
26. Rendimiento: material crudo / energía térmica		53%			

Salidas - Emisiones al aire

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Salidas(Emisiones al aire) (con relación a la producción de 0,3 kg de clinker)	Cantidad (kg)	contribución (%)	Salidas(Emisiones al aire) (con relación a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad (kg)	contribución (%)
27. As ⁽¹⁾ (L)	2,20E-11	0%	52. As ⁽¹⁾ (L)	9,53E-11	0%
28. Benceno (1) (R)	7,09E-08	0%	53. Benceno (1) (R)	3,05E-07	0%
29. Cd ⁽¹⁾ (L)	2,27E-11	0%	54. Cd ⁽¹⁾ (L)	9,53E-11	0%
30. CO ⁽³⁾	6,89E-06	0%	55. CO ⁽³⁾	1,66E-05	0%
31. CO ₂ ⁽³⁾ (G)	8,47E-02	100%	56. CO ₂ ⁽³⁾ (G)	1,37E-01	93%
32. CH ₄ ⁽¹⁾ (R)	1,11E-08	0%	57. CH ₄ ⁽¹⁾ (R)	5,19E-08	0%
33. Cr ⁽¹⁾ (L)	8,86E-11	0%	58. Cr ⁽¹⁾ (L)	3,81E-10	0%
34. Cu ⁽¹⁾ (L)	2,16E-11	0%	59. Cu ⁽¹⁾ (L)	9,53E-11	0%
35. CxHv ⁽¹⁾ (R)	5,03E-06	0%	60. CxHv ⁽¹⁾ (R)	2,55E-05	0%
36. Etilbenceno (1) (L)	3,23E-09	0%	61. HCl ⁽¹⁾ (R)	1,28E-08	0%
37. Formaldeído ⁽¹⁾ (L)	4,79E-09	0%	62. Metales ⁽¹⁾ (L)	1,75E-09	0%
38. HCl ⁽¹⁾ (R)	4,74E-09	0%	63. Ni ⁽¹⁾ (L)	9,53E-11	7%
39. Metales ⁽¹⁾ (L)	8,11E-10	0%	64. NO ₂ ⁽²⁾ (R)	1,64E-04	0%
40. Naftaleno ⁽¹⁾ (R)	5,57E-10	0%	65. NOx ⁽¹⁾ (R)	9,76E-05	0%
41. Ni ⁽¹⁾ (L)	2,20E-11	0%	66. Polvo (SPM) ⁽³⁾ (L)	1,00E-02	0%
42. NO ₂ ⁽²⁾ (R)	1,96E-04	0%	67. SO ₂ ⁽¹⁾ (R) (L)	7,63E-06	0%
43. NOx ⁽¹⁾ (R)	4,90E-05	0%	68. Soot (hollín) (3) (L)	9,78E-06	0%
44. Pb ⁽¹⁾ (L)	6,68E-11	0%	69. SOx ⁽³⁾ (L) (R)	4,79E-04	0%
45. Pentano ⁽¹⁾ (L)	7,35E-09	0%	70. Tolueno ⁽¹⁾ (R)	7,47E-07	0%
46. Polvo (SPM) ⁽³⁾ (L)	2,93E-07	0%	71.		
47. SO ₂ ⁽¹⁾ (R) (L)	5,10E-06	0%	72.		
48. Soot (hollín) (3) (L)	7,17E-07	0%	73.		
49. SOx ⁽³⁾ (L) (R)	1,56E-05	0%	74.		
50. Tolueno ⁽¹⁾ (R)	1,73E-07	0%	75.		
51. Suma	8,50E-02	100%	76. Suma	1,48E-01	100%

Emisiones procedentes de la producción de combustibles y energías⁽¹⁾, planta producción de cemento⁽²⁾ y procedentes de todos subsistemas⁽³⁾.

Emisiones causadoras de impacto ambiental con efecto Global^(G), Regional^(R) y Local^(L)

Sistema	Cement Hoogoven I	Caracterización	Hoja	02/04
----------------	--------------------------	------------------------	-------------	--------------

1. Impacto de Efecto Global

1.1 Efecto Invernadero (Calentamiento Global)

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	CO2 equivalente parcial (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
CO2	8,47E-02	1	8,47E-02		100%
CH4	1,11E-08	11	1,22E-07		0%
				8,47E-02	100%
Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	CO2 equivalente parcial (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
CO2	1,37E-01	1	1,37E-01		100%
CH4	5,19E-08	11	5,71E-07		0%
				1,37E-01	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			CO2 equivalente (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER			8,47E-02		38%
Subsistema de producción de CEMENTO			1,37E-01		62%
				2,22E-01	100%

2. Impacto de Efecto Regional

2.1 Acidificación

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SO2 equivalente parcial (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
HCl	4,74E-09	0,88	4,17E-09		0%
NO2	1,96E-04	0,70	1,37E-04		71%
NOx	4,90E-05	0,70	3,43E-05		18%
SO2	5,10E-06	1	5,10E-06		3%
SOx	1,56E-05	1	1,56E-05		8%
				1,92E-04	100%
Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SO2 equivalente parcial (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
HCl	1,28E-08	0,88	1,13E-08		0%
NO2	1,64E-04	0,70	1,15E-04		17%
NOx	9,76E-05	0,70	6,83E-05		10%
SO2	7,63E-06	1	7,63E-06		1%
SOx	4,79E-04	1	4,79E-04		72%
				6,70E-04	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			SO2 equivalente (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER			1,92E-04		22%
Subsistema de producción de CEMENTO			6,70E-04		78%
				8,62E-04	100%

2.2 Eutrofización

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	PO4 equivalente parcial (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
NO2	1,96E-04	0,13	2,55E-05		80%
NOx	4,90E-05	0,13	6,37E-06		20%
				3,19E-05	100%

Sistema	Cement Hoogoven I	Caracterización	Hoja	03/04
----------------	--------------------------	------------------------	-------------	--------------

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	PO4 equivalente parcial (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
NO2	1,64E-04	0,13	2,13E-05		63%
NOx	9,76E-05	0,13	1,27E-05		37%
					3,40E-05
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			PO4 equivalente (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER			3,19E-05		48%
Subsistema de producción de CEMENTO			3,40E-05		52%
				6,59E-05	100%

2.3 Contaminación de verano (Formación fotoquímica de ozono)

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	C2H4 equivalente parcial (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Benceno	7,09E-08	0,189	1,34E-08		1%
CxHy	5,03E-06	0,398	2,00E-06		94%
CH4	1,11E-08	0,007	7,77E-11		0%
Etilbenceno	3,23E-09	0,593	1,92E-09		0%
Formaldehído	4,79E-09	0,421	2,02E-09		0%
Naftaleno	5,57E-10	0,761	4,24E-10		0%
Pentano	7,35E-09	0,408	3,00E-09		0%
Tolueno	1,73E-07	0,563	9,74E-08		5%
					2,12E-06

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	C2H4 equivalente parcial (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Benceno	3,05E-07	0,189	5,76E-08		1%
CxHy	2,55E-05	0,398	1,01E-05		95%
CH4	5,19E-08	0,007	3,63E-10		0%
Tolueno	7,47E-07	0,563	4,21E-07		4%
				1,06E-05	100%

Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			C2H4 equivalente (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER			2,12E-06		17%
Subsistema de producción de CEMENTO			1,06E-05		83%
				1,27E-05	100%

3. Impacto de Efecto Local

3.1 Contaminación de invierno (Contaminación del aire por partículas en suspensión)

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SPM equivalente parcial (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Polvo (SPM)	2,93E-07	1	2,93E-07		1%
SO2	5,10E-06	1	5,10E-06		23%
SOx	1,56E-05	1	1,56E-05		72%
Soot (hollín)	7,17E-07	1	7,17E-07		3%
				2,17E-05	100%

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SPM equivalente parcial (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Polvo (SPM)	1,00E-02	1	1,00E-02		95%
SO2	7,63E-06	1	7,63E-06		0%
SOx	4,79E-04	1	4,79E-04		5%
Soot (hollín)	9,78E-06	1	9,78E-06		0%
				1,05E-02	100%

Sistema	Cement Hoogoven I	Caracterización	Hoja	04/04
----------------	--------------------------	------------------------	-------------	--------------

Sistema: Producción de CEMENTO			
Subsistemas	SPM equivalente (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER	2,17E-05		0%
Subsistema de producción de CEMENTO	1,05E-02		100%
		1,05E-02	100%

3.2 Carcinógenos

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	B(a)P equivalente parcial (kg)	B(a)P equiv. total (kg)	contribución (%)
As	2,20E-11	0,044	9,68E-13		22%
Benceno	7,09E-08	0,000044	3,12E-12		72%
Etilbenceno	3,23E-09	0,000044	1,42E-13		3%
Ni	2,20E-11	0,0044	9,68E-14		2%
				4,33E-12	100%

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	B(a)P equivalente parcial (kg)	B(a)P equiv. total (kg)	contribución (%)
As	9,53E-11	0,044	4,19E-12		23%
Benceno	3,05E-07	0,000044	1,34E-11		74%
Ni	9,53E-11	0,0044	4,19E-13		2%
				1,80E-11	100%

Sistema: Producción de CEMENTO			
Subsistemas	B(a)P equivalente (kg)	B(a)P equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER	4,33E-12		19%
Subsistema de producción de CEMENTO	1,80E-11		81%
		2,24E-11	100%

3.3 Metales Pesados

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	Pb equivalente parcial (kg)	Pb equiv. total (kg)	contribución (%)
Cd	2,27E-11	50	1,14E-09		94%
Pb	6,68E-11	1	6,68E-11		6%
				1,20E-09	100%

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	Pb equivalente parcial (kg)	Pb equiv. total (kg)	contribución (%)
Cd	9,53E-11	50	4,77E-09		100%
				4,77E-09	100%

Sistema: Producción de CEMENTO			
Subsistemas	Pb equivalente (kg)	Pb equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER	1,20E-09		20%
Subsistema de producción de CEMENTO	4,77E-09		80%
		5,97E-09	100%

--

Sistema	Producción de cemento	
Composición	Subsistema de producción de clinker + subsistema de producción de cemento	
Origen	Inventarios de "SimaPro 4.0" -	País: Holanda
Nomenclatura original	Blast furnace slag cement production	
Hoja	1-4 Analisis del inventario - producción de cemento	
Fuente	SimaPro 4.0 - PRé Consultants, 1997	Hoja 01/03

Entradas - Material y Energía

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (materiales) (con respecto a la producción de 0,25 kg de clinker)	Cantidad de material (kg)	contribución (%)	Entrada (materiales) (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad de material (kg)	contribución (%)
01. Marga	4,25E-01	93%	09. Clinker	2,50E-01	25%
02. Minerales de arcilla	1,50E-02	3%	10. Escorias	7,29E-01	73%
03. Pizarra	1,25E-02	3%	11. Cenizas	2,40E-02	2%
04. Óxidos férricos	5,00E-03	1%	12.		
05.			13.		
06.			14. Suma	1,00E+00	100%
07.			15. Yeso	5,00E-02	
08. Suma	4,58E-01	100%	16. Rendimiento- clinker / material crudo (kg/kg)		55%
17. Clasificación (ENV 197-1): Tipo III / B - Blastfurnace cement					

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (energías) (con respecto a la producción de 0,25 kg de clinker)	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)	Entrada (energías) (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)
18. Electricidad	3,53E-02	4%	22. Electricidad	5,51E-01	82%
19. Energía térmica	8,81E-01	96%	23. Energía térmica	1,20E-01	18%
20.			24.		
21. Suma	9,16E-01	100%	25. Suma	6,71E-01	100%
26. Rendimiento: material crudo / energía térmica		52%			

Salidas - Emisiones al aire

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Salidas (con respecto a la producción de 0,25 kg de clinker)	Cantidad (kg)	contribución (%)	Salidas (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad (kg)	contribución (%)
27. Aldehído ⁽¹⁾ (L)	1,10E-08	0%	49. Aldehído ⁽¹⁾ (L)	1,73E-07	0%
28. Amonia (NH3) ⁽¹⁾ (R)	2,42E-08	0%	50. Amonia (NH3) ⁽¹⁾ (R)	3,79E-07	0%
29. CO ⁽³⁾	1,27E-04	0%	51. CO ⁽³⁾	7,16E-05	0%
30. CO2 ⁽³⁾ (G)	2,35E-01	99%	52. CO2 ⁽³⁾ (G)	9,91E-02	98%
31. CxHy ⁽¹⁾ (R)	5,49E-05	0%	53. CxHy ⁽¹⁾ (R)	8,58E-04	1%
32. HF ⁽¹⁾	1,12E-11	0%	54. HF ⁽¹⁾	1,74E-10	0%
33. N2O ⁽¹⁾ (R)	8,57E-07	0%	55. N2O ⁽¹⁾ (R)	1,34E-05	0%
34. NOx ⁽³⁾ (R)	7,94E-04	0%	56. NOx ⁽³⁾ (R)	3,02E-04	0%
35. Polvo (SPM) ⁽³⁾ (L)	6,26E-05	0%	57. Polvo (SPM) ⁽³⁾ (L)	2,09E-05	0%
36. SO2 ⁽¹⁾ (R) (L)	1,89E-05	0%	58. SO2 ⁽¹⁾ (R) (L)	2,96E-04	0%
37. SOx ⁽²⁾ (L) (R)	2,65E-04	0%	59.		
38.			60.		
39.			61.		
40.			62.		
41.			63.		
42.			64.		
43.			65.		
44.			66.		
45.			67.		
46.			68.		
47.			69.		
48. Suma	2,36E-01	100%	70. Suma	1,01E-01	100%

⁽¹⁾ Emisión procedente exclusivamente de la producción de energía.

⁽²⁾ Emisión procedente exclusivamente de los procesos en la planta de producción de cemento

⁽³⁾ Emisión procedente de ambas fuentes (energía; planta de producción de cemento)

Emisiones causadoras de impacto ambiental con efecto Global^(G) Regional^(R) y Local^(L)

Sistema	Blast furnace slag cement	Caracterización	Hoja	02/03
----------------	----------------------------------	------------------------	-------------	--------------

1. Impacto de Efecto Global

1.1 Efecto Invernadero (Calentamiento Global)

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	CO2 equivalente parcial (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
CO2	2,35E-01	1	2,35E-01		100%
N2O	8,57E-07	270	2,31E-04		0%
				2,35E-01	100%
Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	CO2 equivalente parcial (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
CO2	9,91E-02	1	9,91E-02		96%
N2O	1,34E-05	270	3,62E-03		4%
				1,03E-01	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			CO2 equivalente (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER			2,35E-01		70%
Subsistema de producción de CEMENTO			1,03E-01		30%
				3,38E-01	100%

2. Impacto de Efecto Regional

2.1 Acidificación

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SO2 equivalente parcial (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Amonia (NH3)	2,42E-08	1,88	4,55E-08		0%
HF	1,12E-11	1,60	1,79E-11		0%
NOx	7,94E-04	0,70	5,56E-04		66%
SO2	1,89E-05	1	1,89E-05		2%
SOx	2,65E-04	1	2,65E-04		32%
				8,40E-04	100%
Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SO2 equivalente parcial (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Amonia (NH3)	3,79E-07	1,88	7,13E-07		0%
HF	1,74E-10	1,60	2,78E-10		0%
NOx	3,02E-04	0,70	2,11E-04		42%
SO2	2,96E-04	1	2,96E-04		58%
				5,08E-04	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			SO2 equivalente (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER			8,40E-04		62%
Subsistema de producción de CEMENTO			5,08E-04		38%
				1,35E-03	100%

2.2 Eutrofización

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	PO4 equivalente parcial (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Amonia (NH3)	2,42E-08	0,33	7,99E-09		0%
NOx	7,94E-04	0,13	1,03E-04		100%
				1,03E-04	100%

Sistema		Blast furnace slag cement		Caracterización		Hoja		03/03	
Subsistema: Producción de CEMENTO									
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	PO4 equivalente parcial (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)				
Amonia (NH3)	3,79E-07	0,33	1,25E-07		0%				
NOx	3,02E-04	0,13	3,93E-05		100%				
				3,94E-05	100%				
Sistema: Producción de CEMENTO									
Subsistemas			PO4 equivalente (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)				
Subsistema de producción de CLINKER			1,03E-04		72%				
Subsistema de producción de CEMENTO			3,94E-05		28%				
				1,43E-04	100%				

2.3 Contaminación de verano (Formación fotoquímica de ozono)

Subsistema: Producción de CLINKER						
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	C2H4 equivalente parcial (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)	
Aldehído	1,10E-08	0,443	4,87E-09		0%	
CxHy	5,49E-05	0,398	2,19E-05		100%	
				2,19E-05	100%	
Subsistema: Producción de CEMENTO						
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	C2H4 equivalente parcial (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)	
Aldehído	1,73E-07	0,443	7,66E-08		0%	
CxHy	8,58E-04	0,398	3,41E-04		100%	
				3,42E-04	100%	
Sistema: Producción de CEMENTO						
Subsistemas			PO4 equivalente (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)	
Subsistema de producción de CLINKER			2,19E-05		6%	
Subsistema de producción de CEMENTO			3,42E-04		94%	
				3,63E-04	100%	

3. Impacto de Efecto Local

3.1 Contaminación de invierno (Contaminación del aire por partículas en suspensión)

Subsistema: Producción de CLINKER						
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SPM equivalente parcial (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)	
Polvo (SPM)	6,26E-05	1	6,26E-05		18%	
SO2	1,89E-05	1	1,89E-05		5%	
SOx	2,65E-04	1	2,65E-04		76%	
				3,47E-04	100%	
Subsistema: Producción de CEMENTO						
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SPM equivalente parcial (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)	
Polvo (SPM)	2,09E-05	1	2,09E-05		7%	
SO2	2,96E-04	1	2,96E-04		93%	
				3,17E-04	100%	
Sistema: Producción de CEMENTO						
Subsistemas			SPM equivalente (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)	
Subsistema de producción de CLINKER			3,47E-04		52%	
Subsistema de producción de CEMENTO			3,17E-04		48%	
				6,64E-04	100%	

Sistema	Producción de cemento	
Composición	Sistema de producción de cemento	
Origen	Inventarios - "Cembureau" -	País: Holanda
Nomenclatura original	Blast furnace slag cement NL1	
Hoja de trabajo	1-3 Análisis del inventario - producción de cemento	
Fuente	Inventario disponible en Informe Cembureau	Hoja 01/03

Entradas - Material y Energía

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (materiales) <small>(con respecto a la producción de 0,205 kg de clinker)</small>	Cantidad de material (kg)	contribución (%)	Entrada (materiales) <small>(con respecto a la producción de 1 kg de cemento)</small>	Cantidad de material (kg)	contribución (%)
01. Marga	2,87E-01	84%	09. Clinker*	2,30E-01	24%
02. Minerales de arcilla	7,50E-03	2%	10. Escorias	7,00E-01	74%
03. Óxidos férricos	4,99E-03	1%	11. Cenizas	2,00E-02	2%
04. Pizarra	1,75E-02	5%	12.		
05. Arena de escorias	2,50E-02	7%	13.		
06.			14. Suma	9,50E-01	100%
07.			15. Yeso	5,00E-02	
08. Suma	3,42E-01	100%	16. Rendimiento - clinker / material crudo (kg/kg)		67%
17. Clasificación (ENV 197-1): Tipo III B - Blastfurnace slag			*valor estimado restando de 1 kg la cantidad de adiciones + yeso		

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (energías)	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)	Entrada (energías) <small>(con respecto a la producción de 1 kg de cemento)</small>	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)
18. Electricidad	n.e.		22. Electricidad	2,87E-01	30%
19. Energía térmica	n.e.		23. Energía térmica	6,80E-01	70%
20.			24.		
21. Suma			25. Suma	9,67E-01	100%
26. Rendimiento: material crudo / energía térmica		50%			

Salidas - Emisiones al aire

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Salidas	Cantidad (kg)	contribución (%)	Salidas <small>(con respecto a la producción de 1 kg de cemento)</small>	Cantidad (kg)	contribución (%)
27.			52. CO	1,56E-04	0%
28.			53. CO ₂ ^(G)	2,12E-01	99%
29.			54. F	5,00E-08	0%
30.			55. Metales pesados	1,25E-08	0%
31.			56. NOx ^(R)	8,50E-04	0%
32.			57. Polvo (SPM) ^(L)	1,41E-04	0%
33.			58. SO ₂ ^{(R)(L)}	3,12E-05	0%
34.			59.		
35.			60.		
36.			61.		
37.			62.		
38.			63.		
39.			64.		
40.			65.		
41.			66.		
42.			67.		
43.			68.		
44.			69.		
45.			70.		
46.			71.		
47.			72.		
48.			73.		
49.			74.		
50.			75.		
51. Suma			76. Suma	2,13E-01	100%

1. Emisiones causadoras de impacto ambiental con efecto Global^(G), Regional^(R) y Local^(L)
n.e. - no estimado

Sistema	Blast furnace slag cement NL1	Caracterización	Hoja	02/03
----------------	-------------------------------	------------------------	-------------	--------------

1. Impacto de Efecto Global

1.1 Efecto Invernadero (Calentamiento Global)

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	CO2 equivalente parcial (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
CO2	2,12E-01	1	2,12E-01		100%
				2,12E-01	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			CO2 equivalente (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			2,12E-01		100%
				2,12E-01	100%

2. Impacto de Efecto Regional

2.1 Acidificación

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SO2 equivalente parcial (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
NOx	8,50E-04	0,70	5,95E-04		95%
SO2	3,12E-05	1	3,12E-05		5%
				6,26E-04	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			SO2 equivalente (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			6,26E-04		100%
				6,26E-04	100%

2.2 Eutrofización

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	PO4 equivalente parcial (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
NOx	8,50E-04	0,13	1,11E-04		100%
				1,11E-04	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			PO4 equivalente (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			1,11E-04		100%
				1,11E-04	100%

3. Impacto de Efecto Local

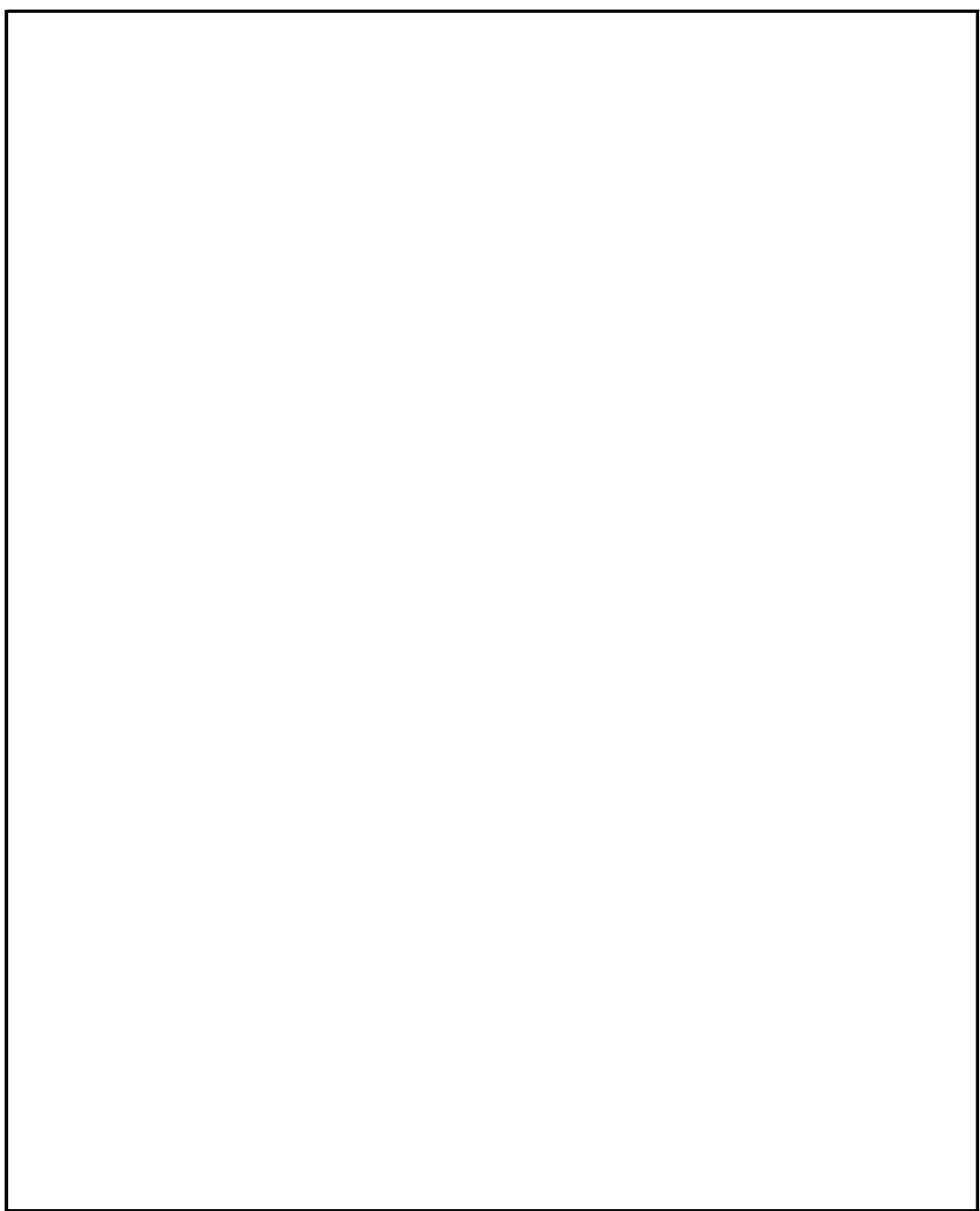
3.1 Contaminación de invierno (Contaminación del aire por partículas en suspensión)

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SPM equivalente parcial (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Polvo (SPM)	1,41E-04	1	1,41E-04		82%
SO2	3,12E-05	1	3,12E-05		18%
				1,72E-04	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			SPM equivalente (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			1,72E-04		100%
				1,72E-04	100%

Sistema	Blast furnace slag cement NL1	Caracterización	Hoja	03/03
----------------	-------------------------------	------------------------	-------------	--------------

3.2 Metales pesados

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	Pb equivalente parcial (kg)	Pb equiv. total (kg)	contribución (%)
Metales pesados	1,25E-08	1	1,25E-08		100%
				1,25E-08	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			Pb equivalente (kg)	Pb equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			1,25E-08		100%
				1,25E-08	100%



Sistema	Producción de cemento	
Composición	Sistema de producción de cemento	
Origen	Inventarios - "Cembureau" -	País: Holanda
Nomenclatura original	Blast furnace slag cement NL2	
Hoja de trabajo	1-3 Análisis del inventario - producción de cemento	
Fuente	Inventario disponible en Informe Cembureau	Hoja 01/03

Entradas - Material y Energía

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (materiales) (con respecto a la producción de 0,24 kg de clinker)	Cantidad de material (kg)	contribución (%)	Entrada (materiales) (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad de material (kg)	contribución (%)
01. Marga	4,20E-01	92%	09. Clinker*	2,37E-01	25%
02. Minerales de arcilla	1,80E-02	4%	10. Escorias	6,75E-01	72%
03. Oxidos ferricos	4,50E-03	1%	11. Cenizas	2,85E-02	3%
04. Pizarra	1,50E-02	3%	12.		
05.			13.		
06.			14. Suma	9,40E-01	100%
07.			15. Yeso	6,00E-02	
08. Suma	4,58E-01	100%	16. Rendimiento - clinker / material crudo (kg/kg)		52%
17. Clasificación (ENV 197-1): Tipo III / B - Blast furnace slag			*valor estimado restando de 1 kg la cantidad de adiciones + yeso		

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (energías)	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)	Entrada (energías) (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)
18. Electricidad	n.e.		22. Electricidad	3,54E-01	25%
19. Energía térmica	n.e.		23. Energía térmica	1,08E+00	75%
20.			24.		
21. Suma			25. Suma	1,43E+00	100%
26. Rendimiento: material crudo / energía térmica		42%			

Salidas - Emisiones al aire

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Salidas	Cantidad (kg)	contribución (%)	Salidas (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad (kg)	contribución (%)
27.			52. CO	6,73E-05	0%
28.			53. CO ₂ ^(G)	1,34E-01	60%
29.			54. NO _x ^(R)	3,99E-04	0%
30.			55. Polvo (SPM) ^(L)	8,86E-02	40%
31.			56. SO ₂ ^{(R)(L)}	4,30E-04	0%
32.			57. VOC ^(R)	9,40E-06	0%
33.			58.		
34.			59.		
35.			60.		
36.			61.		
37.			62.		
38.			63.		
39.			64.		
40.			65.		
41.			66.		
42.			67.		
43.			68.		
44.			69.		
45.			70.		
46.			71.		
47.			72.		
48.			73.		
49.			74.		
50.			75.		
51. Suma			76. Suma	2,24E-01	100%

1. Emisiones causadoras de impacto ambiental con efecto Global^(G), Regional^(R) y Local^(L)
n.e. - no estimado

Sistema	Blast furnace slag cement NL2	Caracterización	Hoja	02/03
----------------	-------------------------------	------------------------	-------------	--------------

1. Impacto de Efecto Global

1.1 Efecto Invernadero (Calentamiento Global)

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	CO2 equivalente parcial (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
CO2	1,34E-01	1	1,34E-01		100%
				1,34E-01	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			CO2 equivalente (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			1,34E-01		100%
				1,34E-01	100%

2. Impacto de Efecto Regional

2.1 Acidificación

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SO2 equivalente parcial (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
NOx	3,99E-04	0,70	2,79E-04		39%
SO2	4,30E-04	1	4,30E-04		61%
				7,09E-04	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			SO2 equivalente (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			7,09E-04		100%
				7,09E-04	100%

2.2 Eutrofización

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	PO4 equivalente parcial (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
NOx	3,99E-04	0,13	5,19E-05		100%
				5,19E-05	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			PO4 equivalente (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			5,19E-05		100%
				5,19E-05	100%

2.3 Contaminación de verano (Formación fotoquímica de ozono)

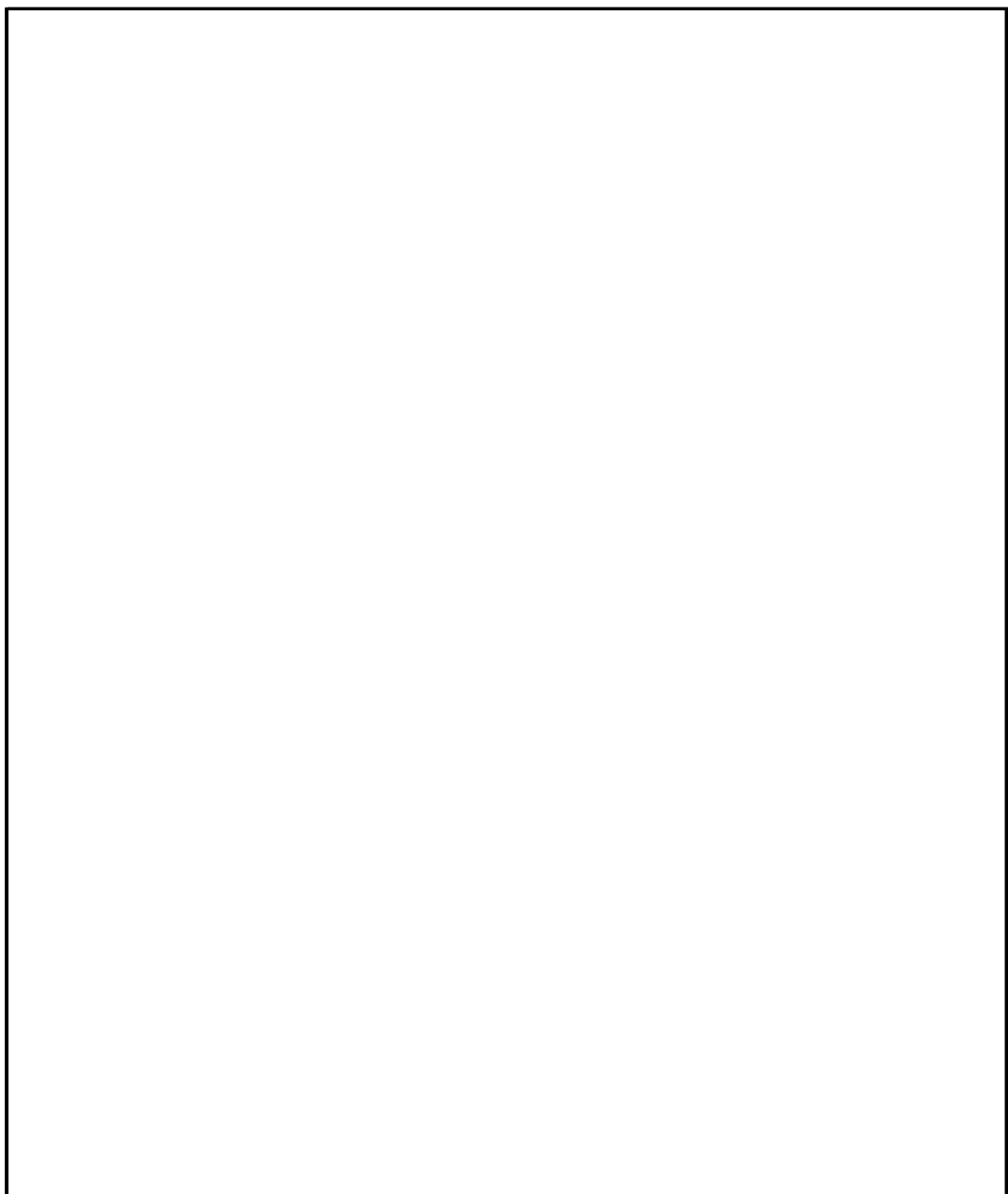
Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	C2H4 equivalente parcial (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	Participación contribución (%)
VOC	9,40E-06	0,398	3,74E-06		100%
				3,74E-06	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			C2H4 equivalente (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	Participación contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			3,74E-06		100%
				3,74E-06	100%

Sistema	Blast furnace slag cement NL2	Caracterización	Hoja	03/03
----------------	--------------------------------------	------------------------	-------------	--------------

3. Impacto de Efecto Local

3.1 Contaminación de invierno (Contaminación del aire por partículas en suspensión)

Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SPM equivalente parcial (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Polvo (SPM)	8,86E-02	1	8,86E-02		100%
SO2	4,30E-04	1	4,30E-04		0%
				8,90E-02	100%
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			SPM equivalente (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CEMENTO			8,90E-02		100%
				8,90E-02	100%



Sistema	Producción de cemento	
Subsistemas	Producción de clinker y producción de cemento	
Origen	Inventarios del "SimaPro" -	País: Holanda
Nomenclatura original	Portlandshcement production	
Hojas de trabajo	1-3 Analisis del inventario - producción de cemento	
Fuente	Inventario disponible en el SimaPro 4.0	Hoja 01/03

Entradas - Material y Energía

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (materiales) (con respecto a la producción de 0,7 kg de clinker)	Cantidad de material (kg)	contribución (%)	Entrada (materiales) (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad de material (kg)	contribución (%)
01. Marga	1,19E+00	93%	09. Clinker	7,00E-01	64%
02. Minerales de arcilla	4,20E-02	3%	10. Escorias	8,10E-02	7%
03. Pizarra	3,50E-02	3%	11. Cenizas	3,17E-01	29%
04. Óxidos férricos	1,40E-02	1%	12.		
05.			13.		
06.			14. Suma	1,10E+00	100%
07.			15. Yeso	5,00E-02	
08. Suma	1,28E+00	100%	16. Rendimiento - clinker / material crudo (kg/kg)		55%
17. Clasificación (ENV 197-1): Tipo IV / B - Pozzolanic cement					

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Entrada (energías) (con respecto a la producción de 0,7 kg de clinker)	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)	Entrada (Energías) (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad de energía (MJ)	contribución (%)
18. Electricidad	9,87E-02	4%	22. Electricidad	1,94E-01	82%
19. Energía térmica	2,49E+00	96%	23. Energía térmica	4,23E-02	18%
20.			24.		
21. Suma	2,59E+00	100%	25. Suma	2,36E-01	100%
26. Rendimiento: material crudo / energía térmica		51%			

Salidas - Emisiones al aire

Subsistema: Producción de CLINKER			Subsistema: Producción de CEMENTO		
Salidas (con respecto a la producción de 0,7 kg de clinker)	Cantidad kg	contribución %	Salidas (con respecto a la producción de 1 kg de cemento)	Cantidad kg	contribución %
27. Aldehído ⁽¹⁾ (L)	3,09E-08	0%	49. Aldehído ⁽¹⁾ (L)	6,08E-08	0%
28. Amonia ⁽¹⁾ (R)	6,78E-08	0%	50. Amonia ⁽¹⁾ (R)	1,33E-07	0%
29. CO ⁽³⁾	3,56E-04	0%	51. CO ⁽³⁾	2,52E-05	0%
30. CO2 ⁽³⁾ (G)	6,58E-01	99%	52. CO2 ⁽³⁾ (G)	3,49E-02	98%
31. CxHy ⁽¹⁾ (R)	1,54E-04	0%	53. CxHy ⁽¹⁾ (R)	3,02E-04	1%
32. HF ⁽¹⁾	3,13E-11	0%	54. HF ⁽¹⁾	6,14E-11	0%
33. N2O ⁽¹⁾ (G)	2,04E-06	0%	55. N2O ⁽¹⁾ (G)	4,71E-06	0%
34. NOx ⁽³⁾ (R)	2,22E-03	0%	56. NOx ⁽³⁾ (R)	1,06E-04	0%
35. Polvo (SPM) ⁽³⁾ (L)	1,75E-04	0%	57. Polvo (SPM) ⁽³⁾ (L)	7,38E-06	0%
36. SO2 ⁽¹⁾ (R) (L)	5,30E-05	0%	58. SO2 ⁽¹⁾ (R) (L)	1,04E-04	0%
37. SOx ⁽²⁾ (L) (R)	7,42E-04	0%	59.		
38.			60.		
39.			61.		
40.			62.		
41.			63.		
42.			64.		
43.			65.		
44.			66.		
45.			67.		
46.			68.		
47.			69.		
48. Suma	6,62E-01	100%	70. Suma	3,54E-02	100%

(1) Emisión procedente exclusivamente de la producción de energía.
 (2) Emisión procedente exclusivamente de los procesos en la planta de producción de cemento
 (3) Emisión procedente de ambas fuentes (energía; planta de producción de cemento)
 Emisiones causadoras de impacto ambiental de efecto global^(G), Regional^(R) y Local^(L)

Sistema	Portlandashcement	Caracterización	Hoja	02/03
----------------	--------------------------	------------------------	-------------	--------------

1. Impacto de Efecto Global

1.1 Efecto Invernadero (Calentamiento Global)

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	CO2 equivalente parcial (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
CO2	6,58E-01	1	6,58E-01		100%
N2O	2,04E-06	270	5,51E-04		0%
					6,59E-01
Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	CO2 equivalente parcial (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
CO2	3,49E-02	1	3,49E-02		96%
N2O	4,71E-06	270	1,27E-03		4%
					3,62E-02
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			CO2 equivalente (kg)	CO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER			6,59E-01		95%
Subsistema de producción de CEMENTO			3,62E-02		5%
				6,95E-01	100%

2. Impacto de Efecto Regional

2.1 Acidificación

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SO2 equivalente parcial (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Amonia	6,78E-08	1,88	1,27E-07		0%
HF	3,13E-11	1,60	5,01E-11		0%
NOx	2,22E-03	0,70	1,55E-03		66%
SO2	5,30E-05	1	5,30E-05		2%
SOx	7,42E-04	1	7,42E-04		32%
					2,35E-03
Subsistema: Producción de CEMENTO					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SO2 equivalente parcial (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Amonia	1,33E-07	1,88	2,50E-07		0%
HF	6,14E-11	1,60	9,82E-11		0%
NOx	1,06E-04	0,70	7,42E-05		42%
SO2	1,04E-04	1	1,04E-04		58%
					1,78E-04
Sistema: Producción de CEMENTO					
Subsistemas			SO2 equivalente (kg)	SO2 equiv. total (kg)	contribución (%)
Subsistema de producción de CLINKER			2,35E-03		93%
Subsistema de producción de CEMENTO			1,78E-04		7%
				2,53E-03	100%

2.2 Eutrofización

Subsistema: Producción de CLINKER					
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	PO4 equivalente parcial (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)
Amonia	6,78E-08	0,33	2,24E-08		0%
NOx	2,22E-03	0,13	2,89E-04		100%
				2,89E-04	100%

Sistema		Portlandashcement		Caracterización		Hoja		03/03	
Subsistema: Producción de CEMENTO									
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	PO4 equivalente parcial (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)				
Amonia	1,33E-07	0,33	4,39E-08		0%				
NOx	1,06E-04	0,13	1,38E-05		100%				
				1,38E-05	100%				
Sistema: Producción de CEMENTO									
Subsistemas			PO4 equivalente (kg)	PO4 equiv. total (kg)	contribución (%)				
Subsistema de producción de CLINKER			2,89E-04		95%				
Subsistema de producción de CEMENTO			1,38E-05		5%				
				3,02E-04	100%				

2.3 Contaminación de verano (Formación fotoquímica de ozono)

Subsistema: Producción de CLINKER						
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	C2H4 equivalente parcial (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)	
Aldehido	3,09E-08	0,443	1,37E-08		0%	
CxHy	1,54E-04	0,398	6,13E-05		100%	
				6,13E-05	100%	
Subsistema: Producción de CEMENTO						
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	C2H4 equivalente parcial (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)	
Aldehido	6,08E-08	0,443	2,69E-08		0%	
CxHy	3,02E-04	0,398	1,20E-04		100%	
				1,20E-04	100%	
Sistema: Producción de CEMENTO						
Subsistemas			C2H4 equivalente (kg)	C2H4 equiv. total (kg)	contribución (%)	
Subsistema de producción de CLINKER			6,13E-05		34%	
Subsistema de producción de CEMENTO			1,20E-04		66%	
				1,82E-04	100%	

3. Impacto de Efecto Local

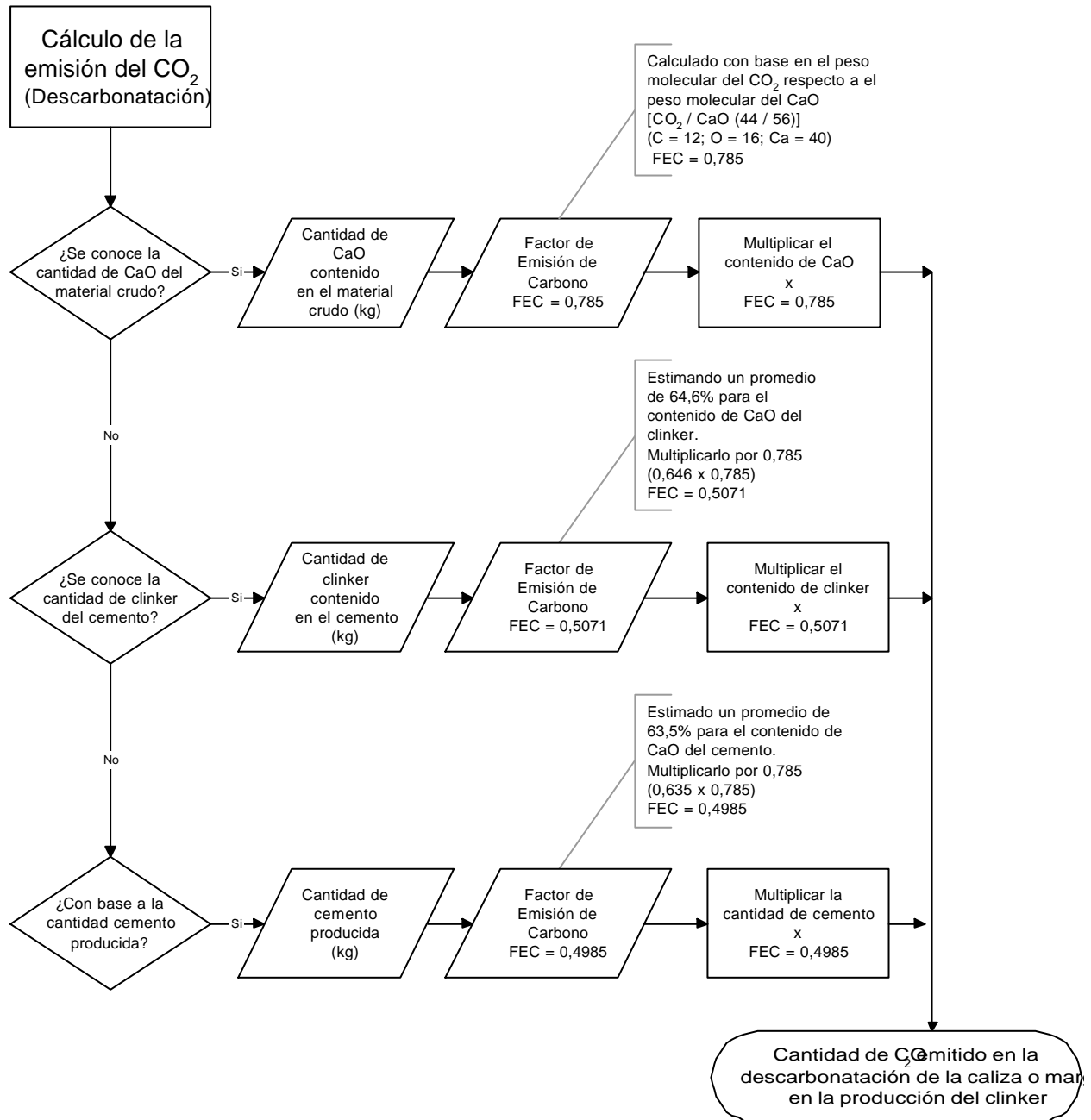
3.1 Contaminación de invierno (Contaminación del aire por partículas en suspensión)

Subsistema: Producción de CLINKER						
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SPM equivalente parcial (kg)	SPM equiv. total (kg)	Participación contribución (%)	
Polvo (SPM)	1,75E-04	1	1,75E-04		18%	
SO2	5,30E-05	1	5,30E-05		5%	
SOx	7,42E-04	1	7,42E-04		76%	
				9,70E-04	100%	
Subsistema: Producción de CEMENTO						
Sustancia emitida	Cantidad emitida (kg)	factor de caracterización	SPM equivalente parcial (kg)	SPM equiv. total (kg)	Participación contribución (%)	
Polvo (SPM)	7,38E-06	1	7,38E-06		7%	
SO2	1,04E-04	1	1,04E-04		93%	
				1,11E-04	100%	
Sistema: Producción de CEMENTO						
Subsistemas			SPM equivalente (kg)	SPM equiv. total (kg)	contribución (%)	
Subsistema de producción de CLINKER			9,70E-04		90%	
Subsistema de producción de CEMENTO			1,11E-04		10%	
				1,08E-03	100%	

ANEJO 3

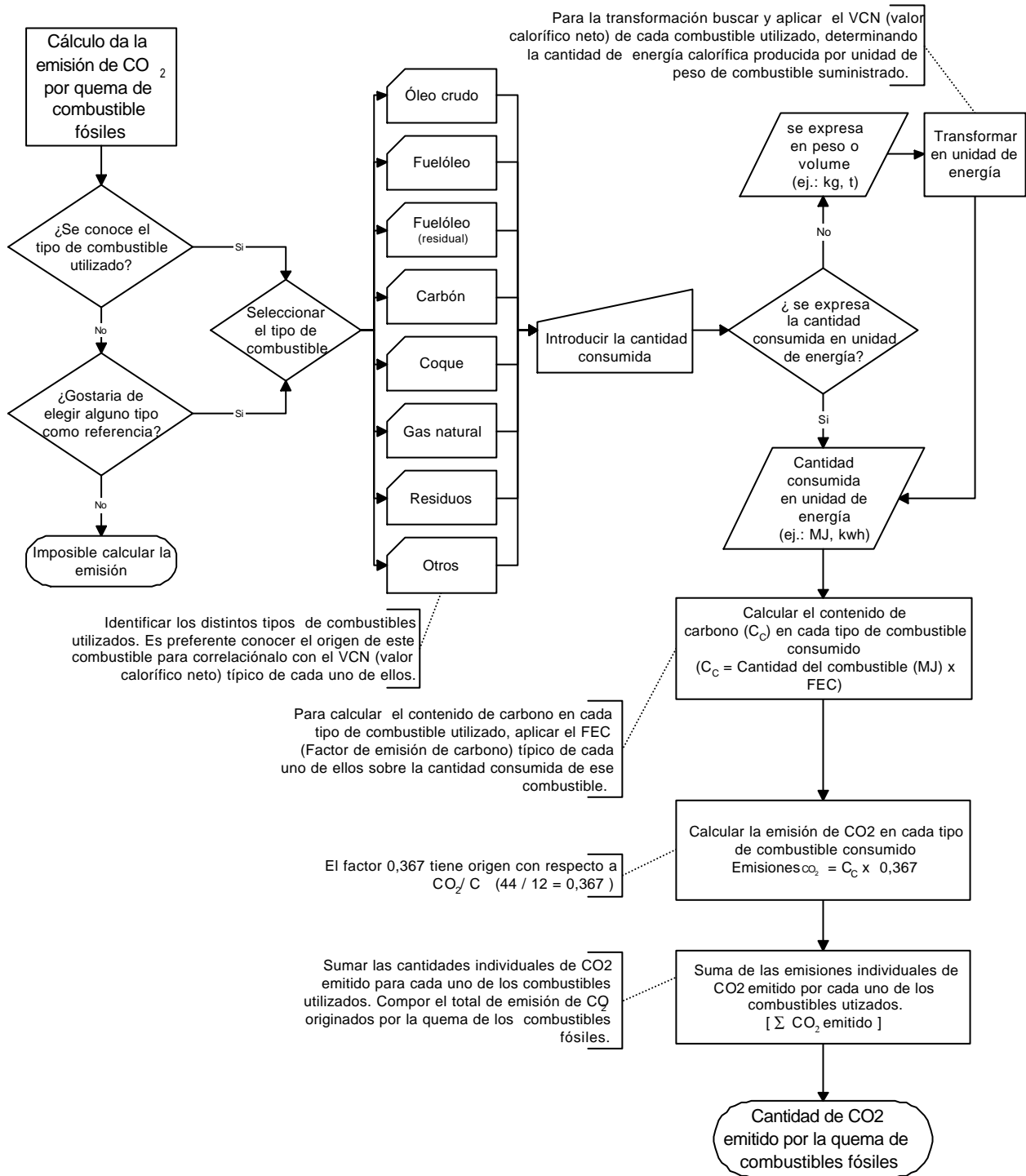
MODELOS PARA INVENTARIAR LAS EMISIONES DE CO₂, NO_x Y SO₂, A PARTIR DE LA PRODUCCIÓN DE CEMENTO Y DE FUENTES ENERGÉTICAS

A3.1 - Flujo para inventariar las emisiones de CO₂ originado en la producción del cemento portland. Basado en la metodología del IPCC¹. Fuente generadora: Descarbonatación de la materia prima en la producción de clinker.

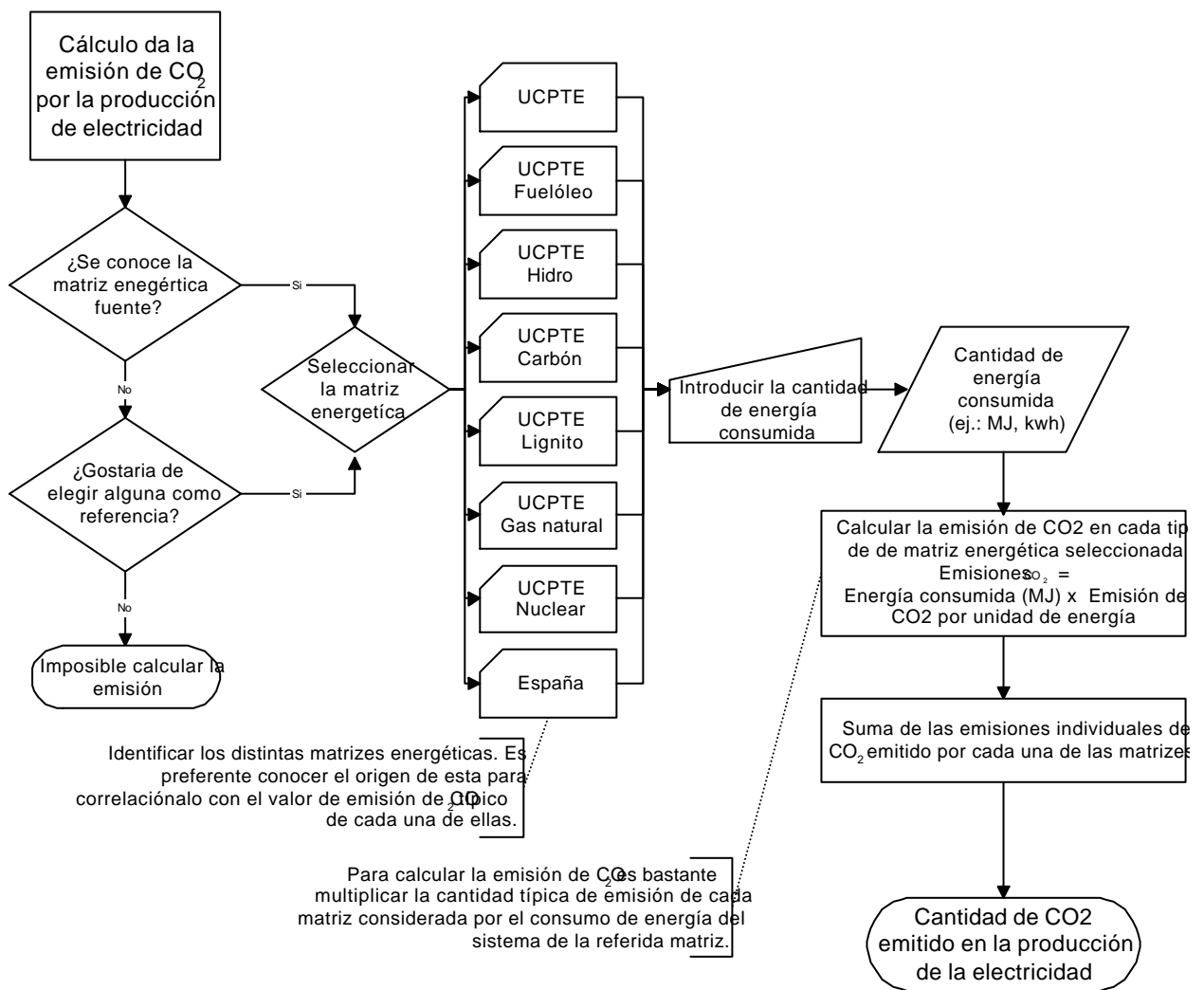


¹ IPCC/OECD/IEA (1996) – IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Reference Manual

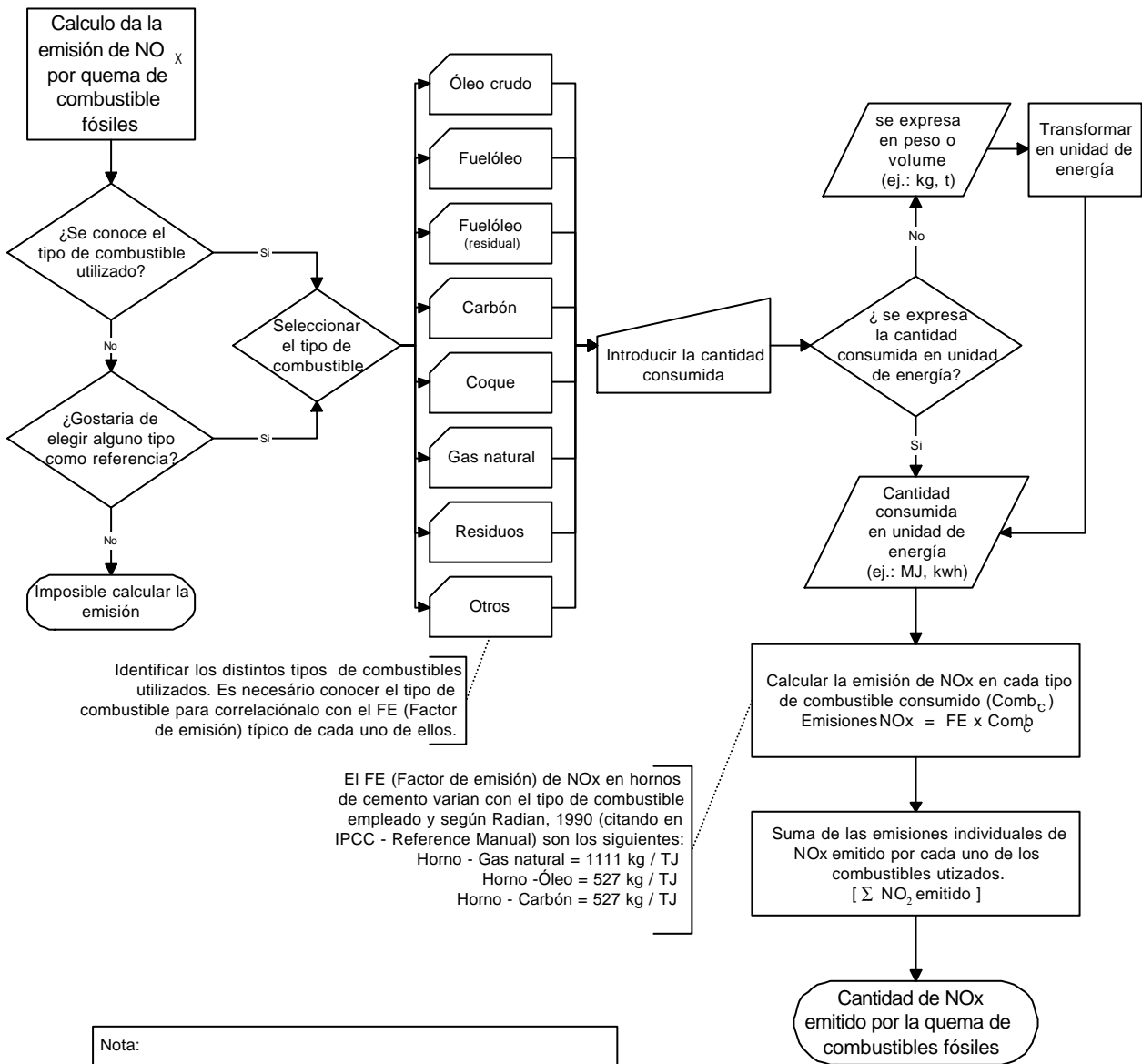
A3.2 - Flujo para inventariar las emisiones de CO₂ originado en la producción del cemento portland. Basado en la metodología del IPCC – Fuente generadora: *Quema del combustible fósil en el horno de producción de clinker.*



A3.3 - Flujo para inventariar las emisiones de CO₂ originado en la producción del cemento portland. Basado en la metodología del IPCC – Fuente generadora: *Matriz energética para la producción de la electricidad suministrada a la planta de producción de cemento.*



A3.4 - Flujo para inventariar las emisiones de NO_x originado en la producción del cemento portland. Basado en la metodología del IPCC – Fuente generadora: *Quema del combustible fósil en el horno de producción de clinker.*

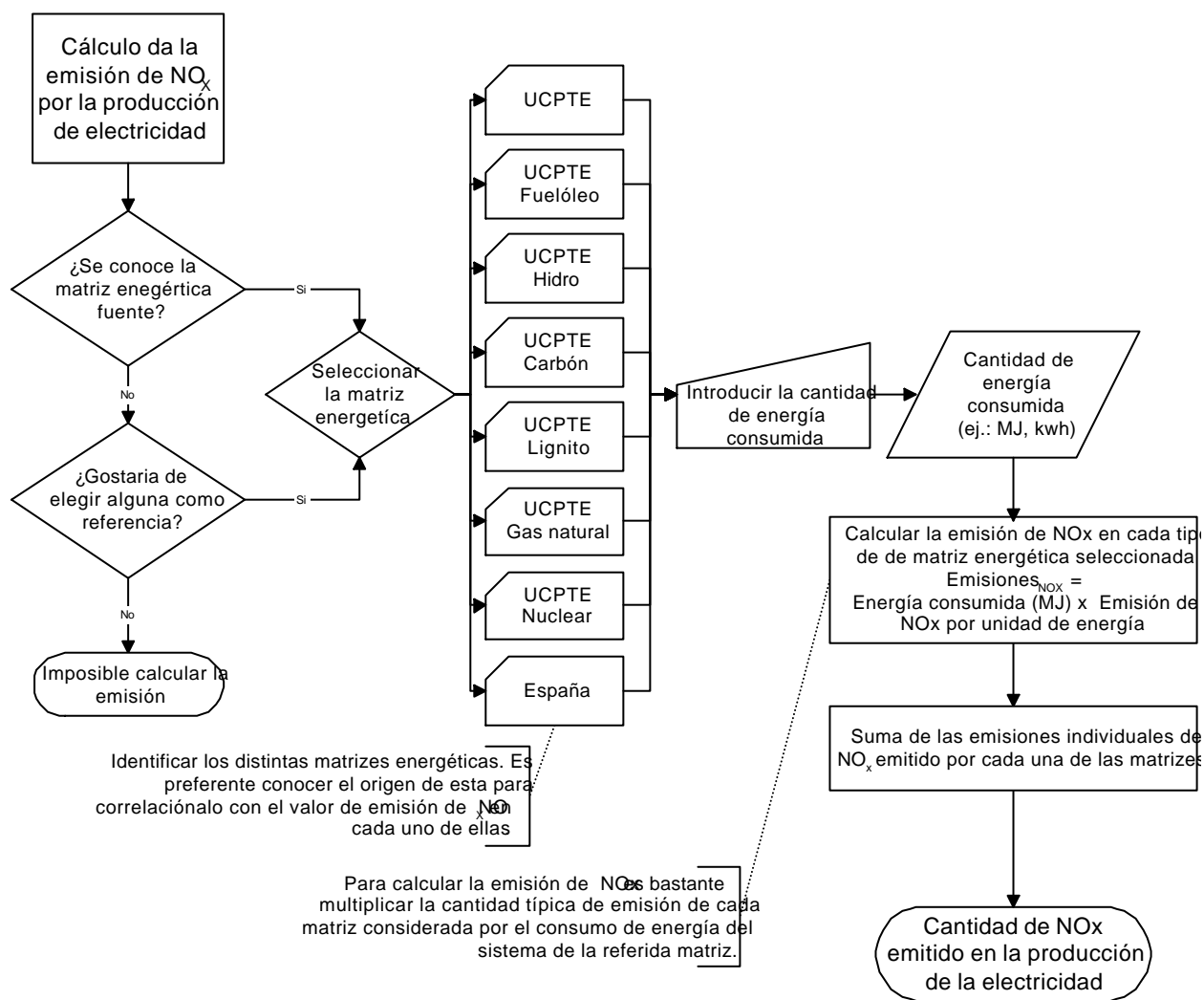


Identificar los distintos tipos de combustibles utilizados. Es necesario conocer el tipo de combustible para correlacionarlo con el FE (Factor de emisión) típico de cada uno de ellos.

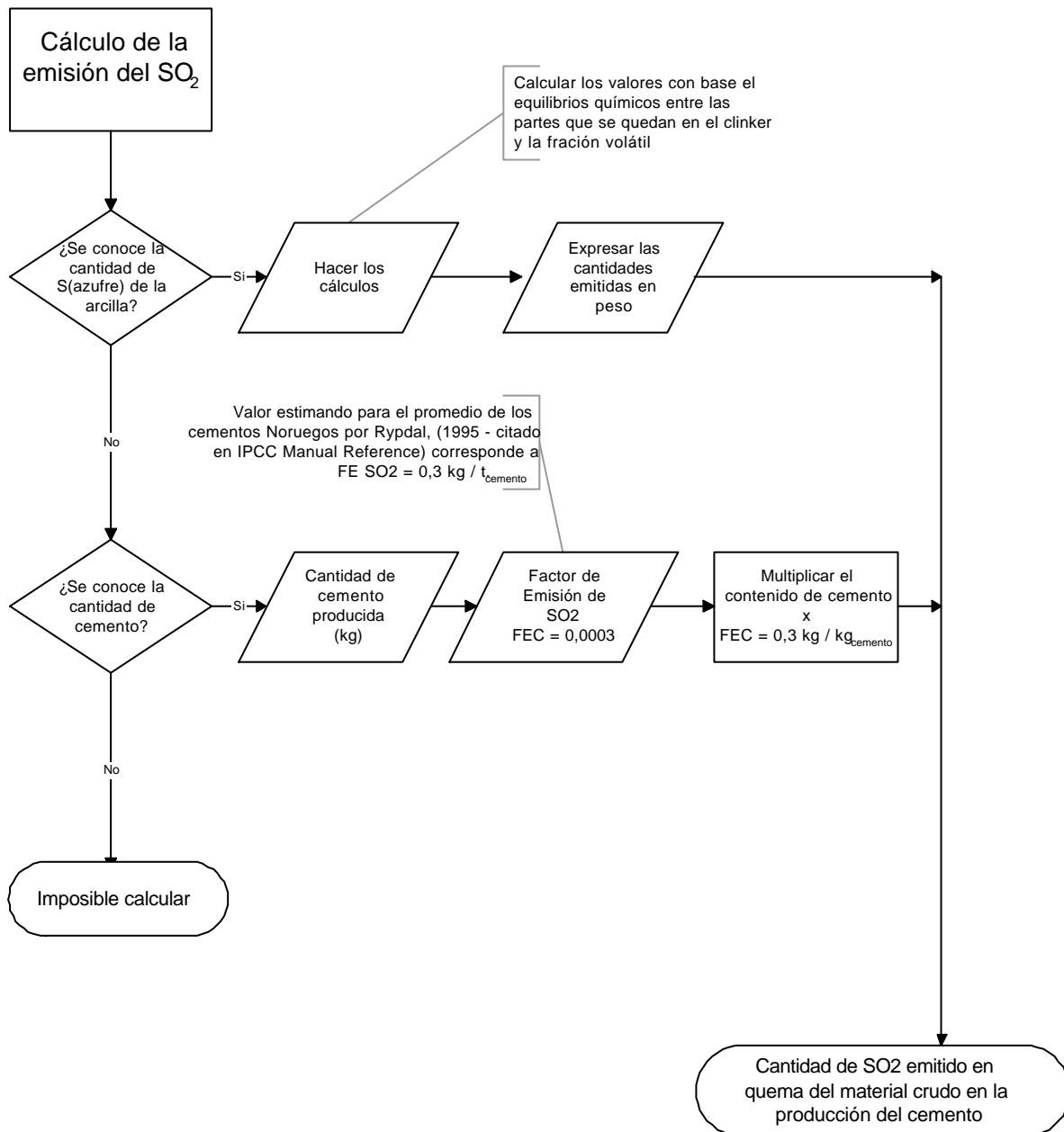
El FE (Factor de emisión) de NO_x en hornos de cemento varían con el tipo de combustible empleado y según Radian, 1990 (citando en IPCC - Reference Manual) son los siguientes:
 Horno - Gas natural = 1111 kg / TJ
 Horno - Óleo = 527 kg / TJ
 Horno - Carbón = 527 kg / TJ

Nota:
 La emisiones del NO_x (Óxido de nitrógeno) son variables en función del tipo de combustible empleado, la alta temperatura de quema y exceso de aire (dependen de la tecnología usada), además de la eficiencia de las instalaciones en el control de esa emisiones. (Instalaciones vieja son menos eficientes) - IPCC, 1996.

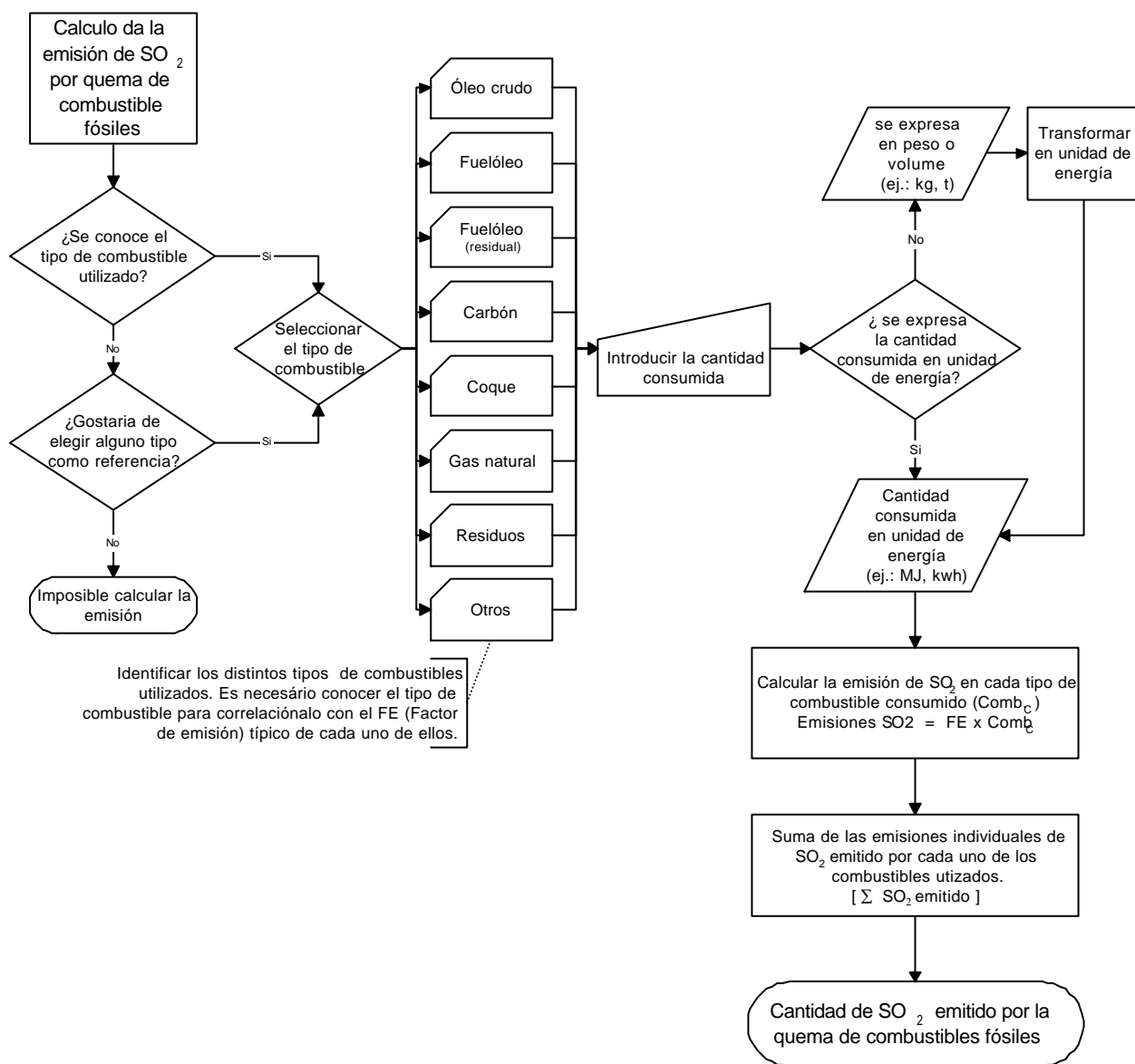
A3.5 - Flujo para inventariar las emisiones de NO_x originado en la producción del cemento portland. Basado en la metodología del IPCC – Fuente generadora: *Matriz energética de la producción de electricidad suministrada a la planta de producción de cemento.*



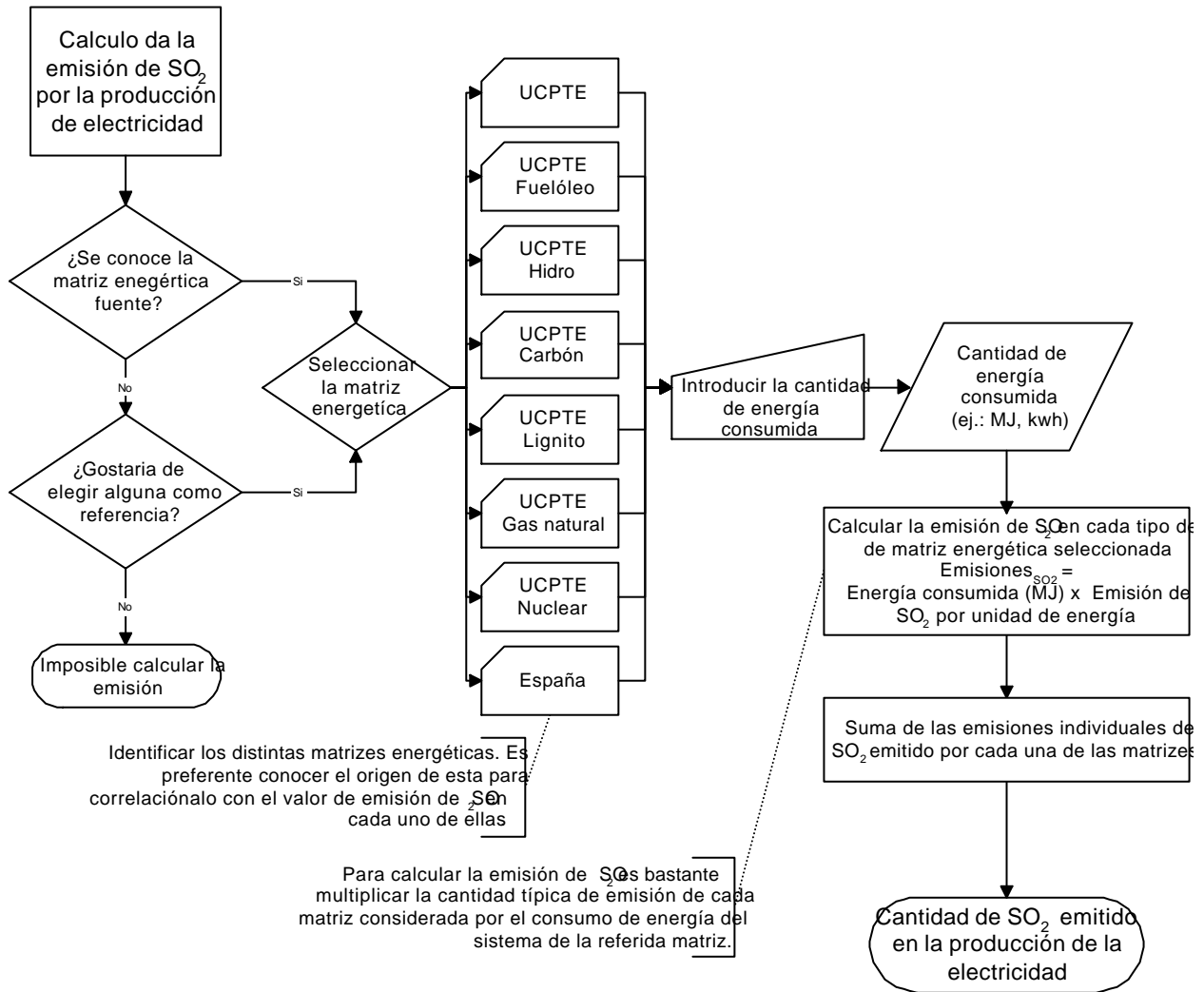
A3.6 - Flujo para inventariar las emisiones de SO₂ originado en la producción del cemento portland. Basado en la metodología del IPCC – Fuente generadora: *Quema de la materia prima en la producción de clinker.*



A3.7 - Flujo para inventariar las emisiones de SO₂ originado en la producción del cemento portland. Basado en la metodología del IPCC – Fuente generadora: *Quema del combustible fósil en el horno de producción de clinker.*



A3.8 - Flujo para inventariar las emisiones de SO₂ originado en la producción del cemento portland. Basado en la metodología del IPCC – Fuente generadora: *Matriz energética de la producción de electricidad suministrada a la planta de producción de cemento.*

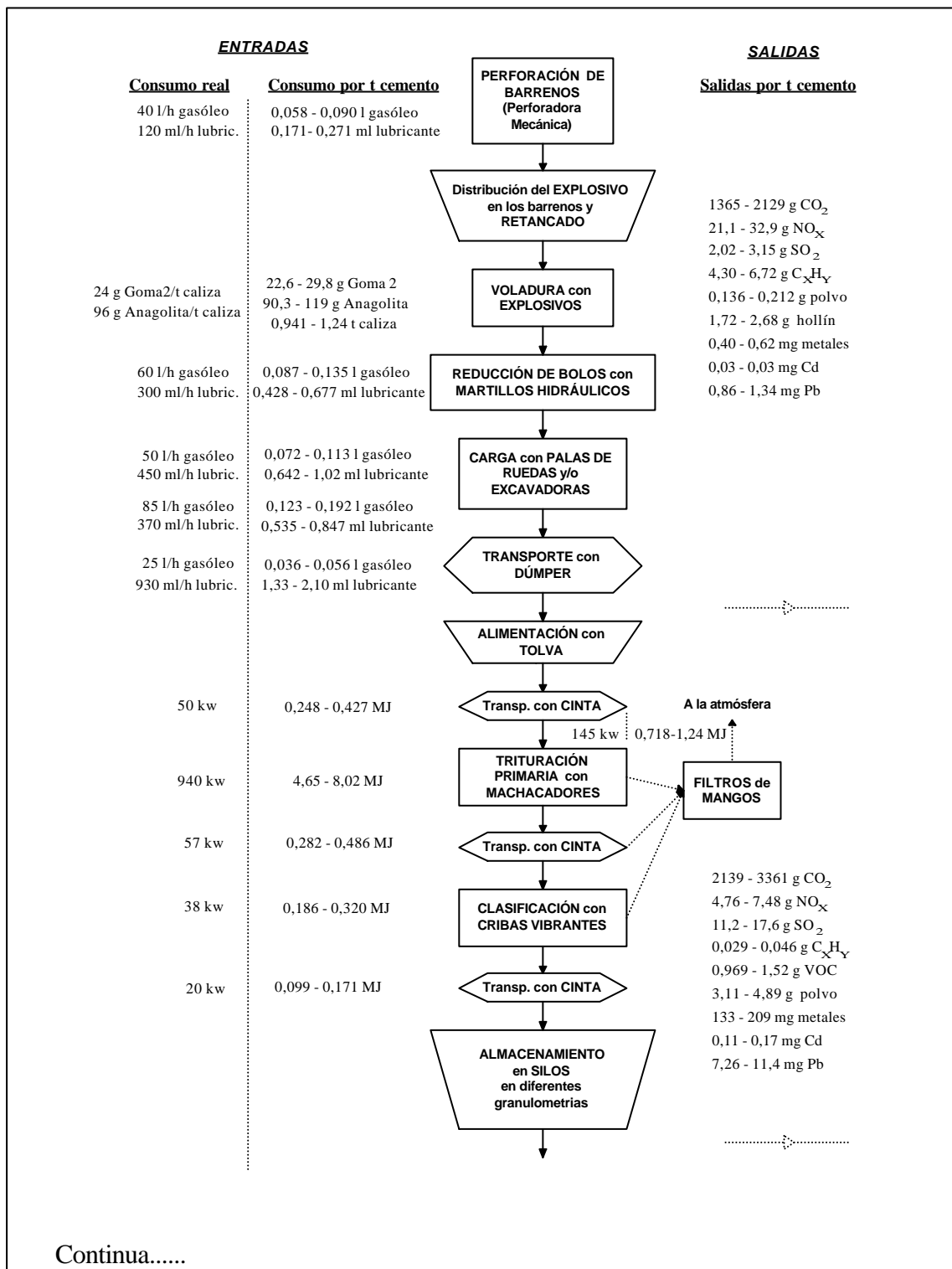


ANEJO 4

DIAGRAMAS DEL PROCESO

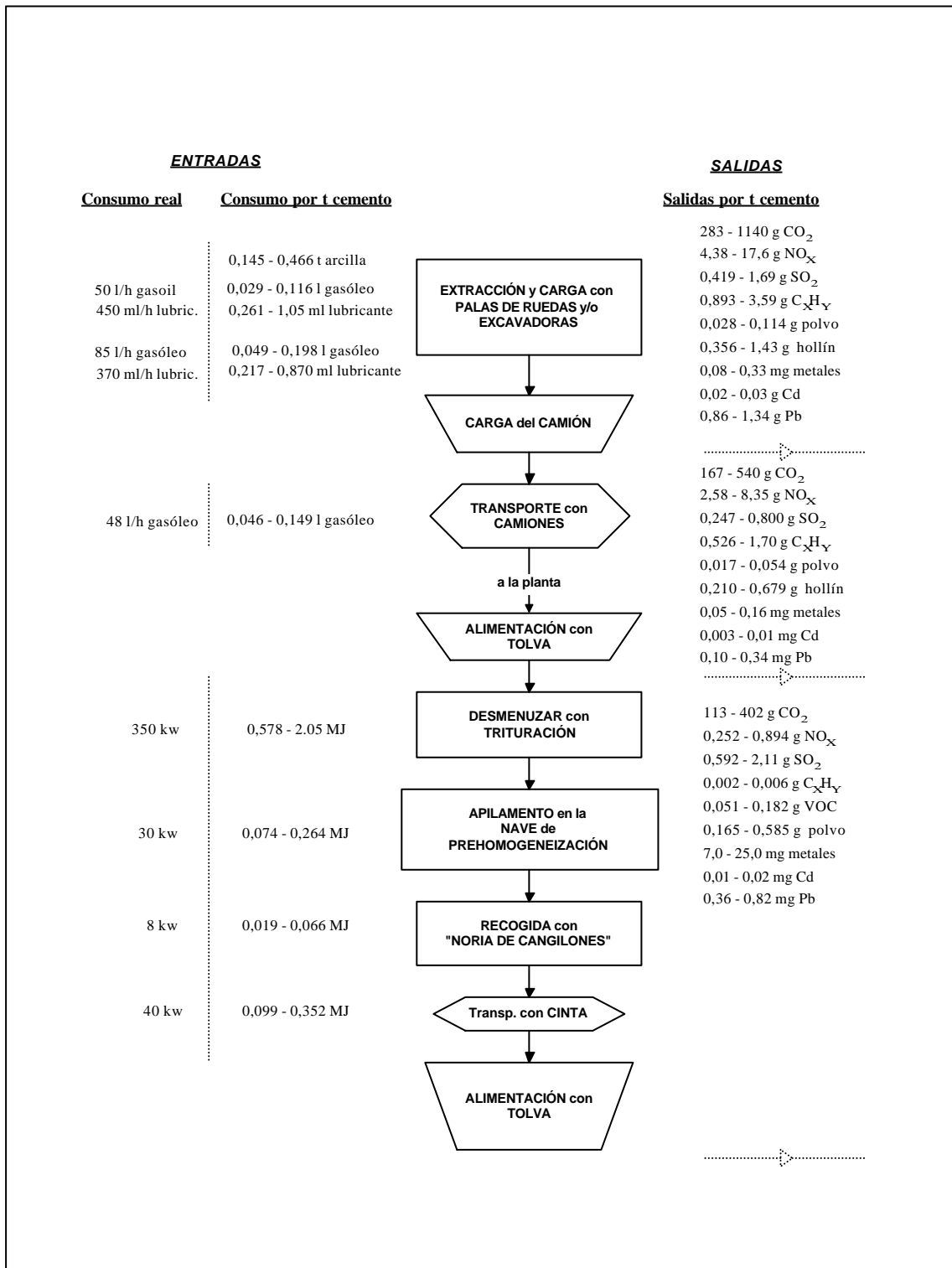
A4.1 - Fase 1 - Subsistema CANTERA - Extracción, Trituración y Prehomogeneización de las materias primas

CALIZA



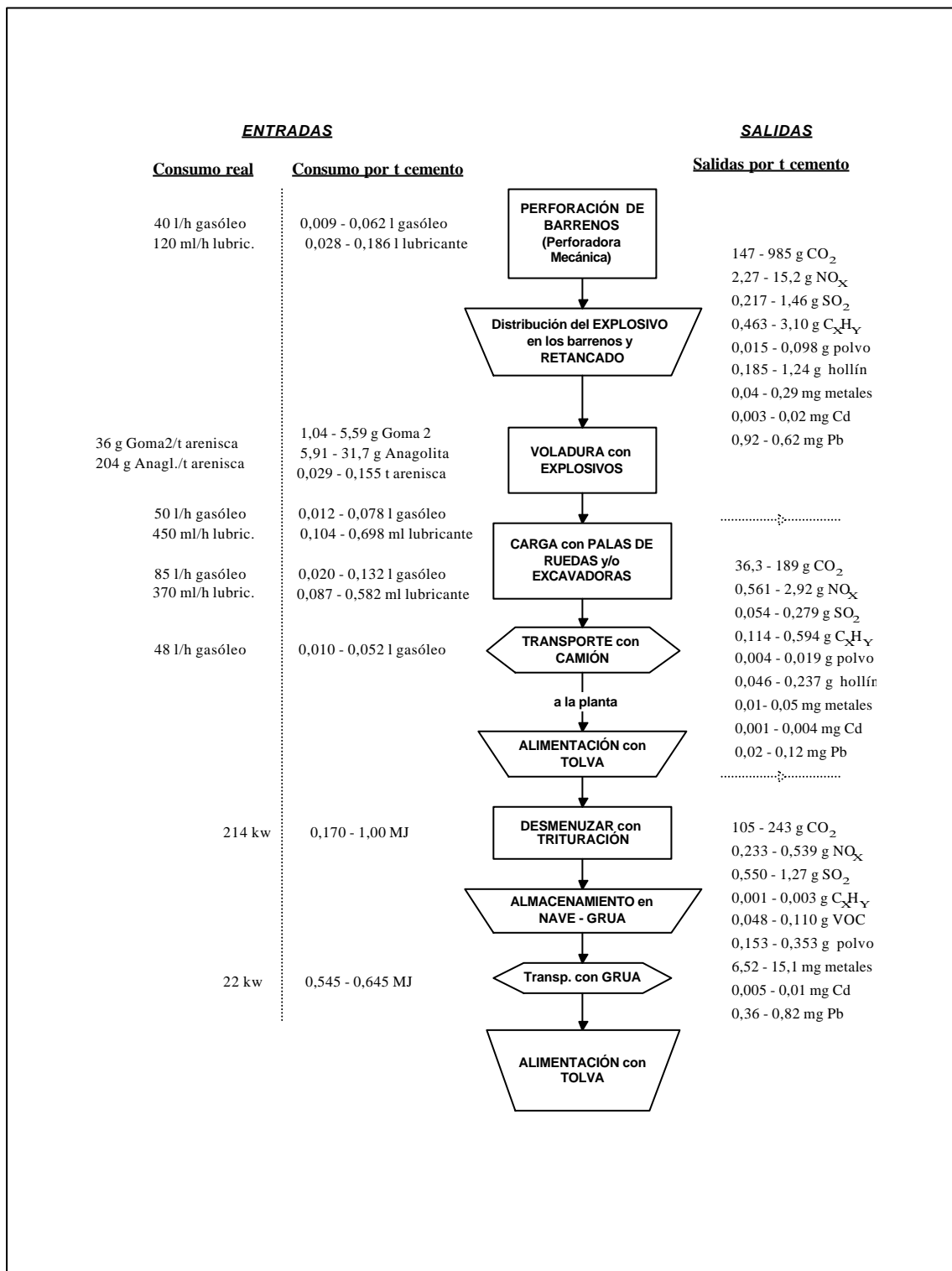
A4.2 - Fase 1 - Subsistema CANTERA - Extracción, Trituración y Prehomogeneización de las materias primas

ARCILLA



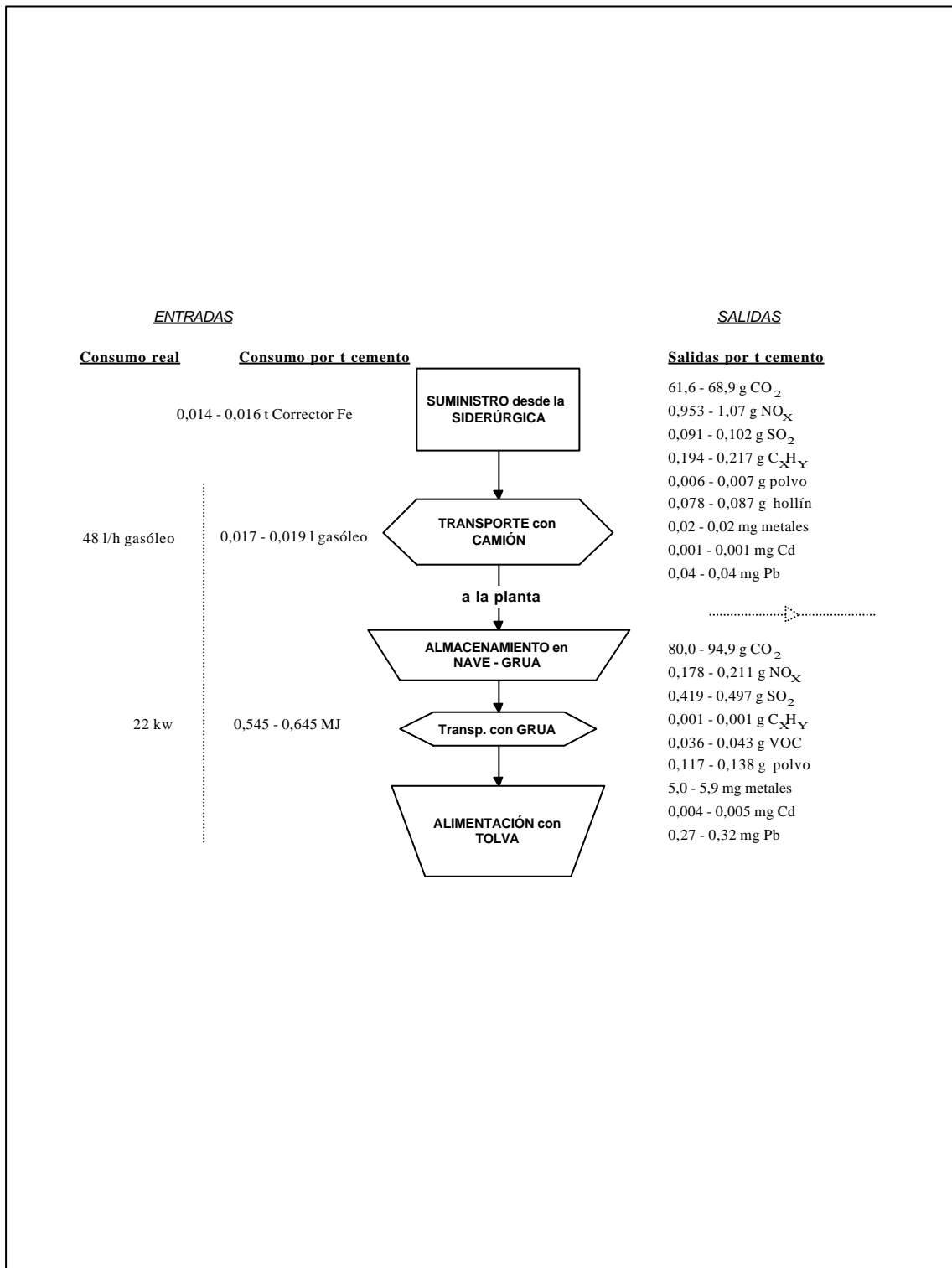
A4.3 - Fase 1 - Subsistema CANTERA - Extracción, Trituración y Prehomogeneización de las materias primas

ARENISCA

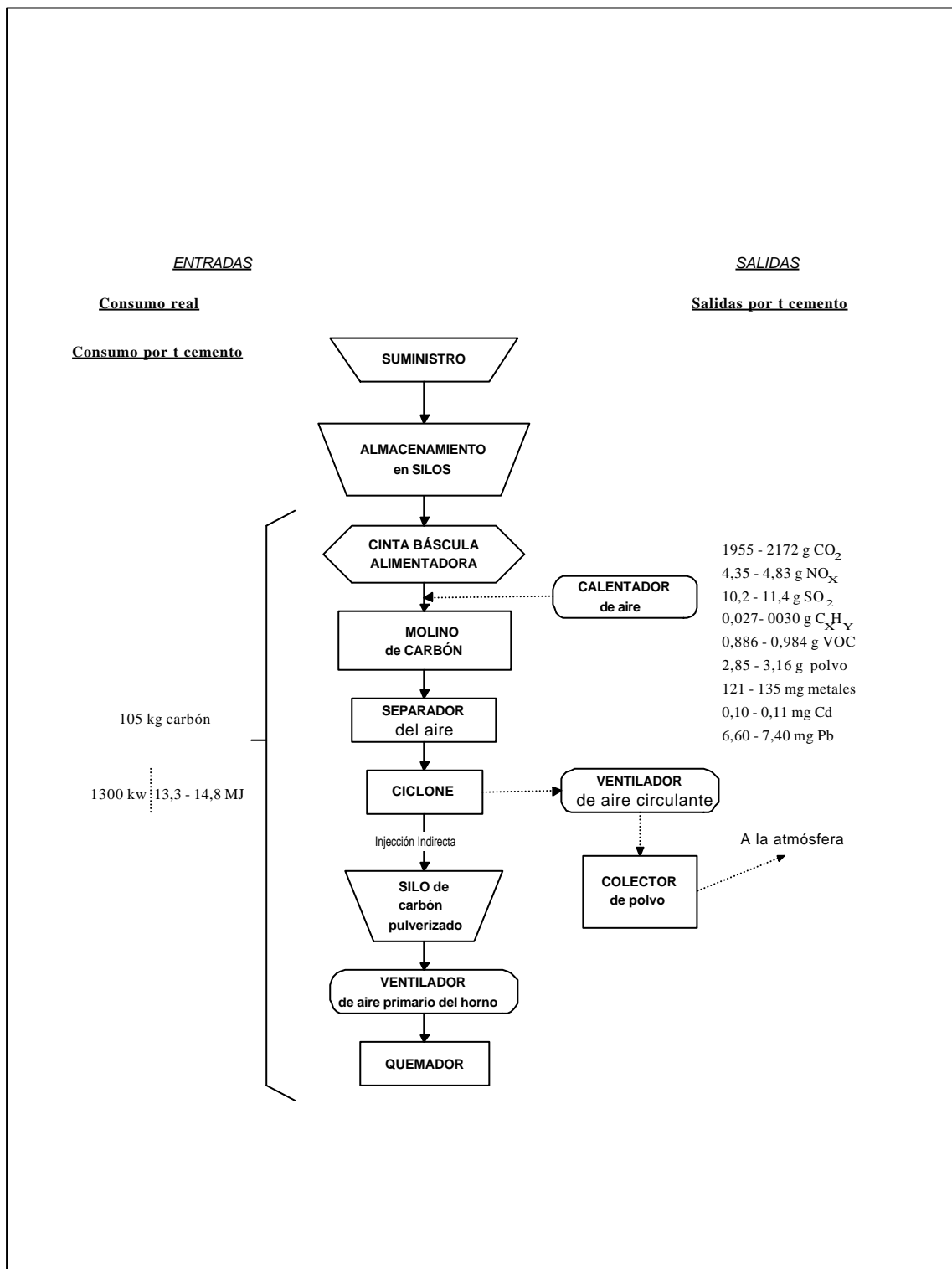


A4.4 - Fase 1 - Subsistema CANTERA - Extracción, Trituración y Prehomogeneización de las materias primas

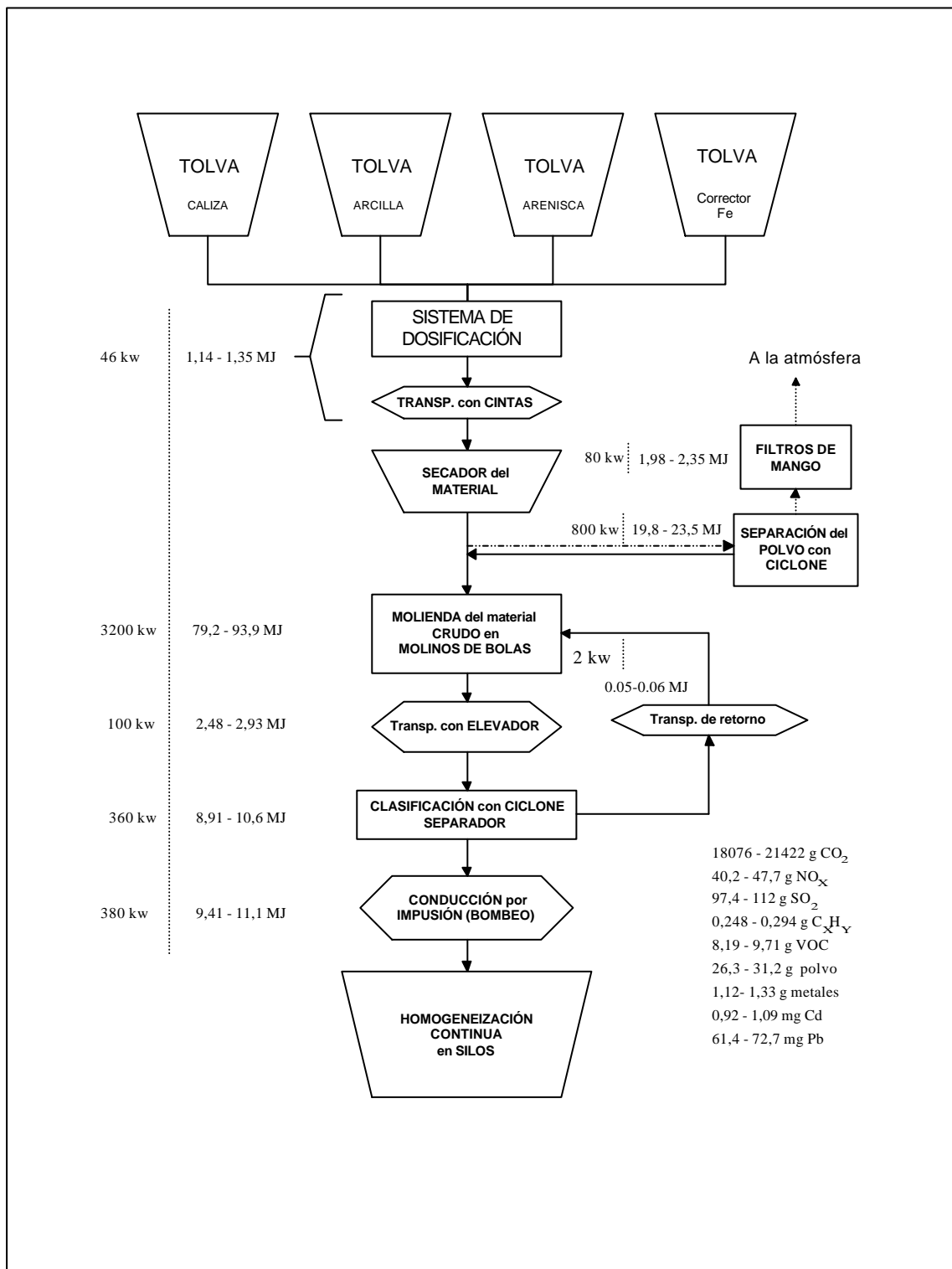
CORRECTOR DE HIERRO



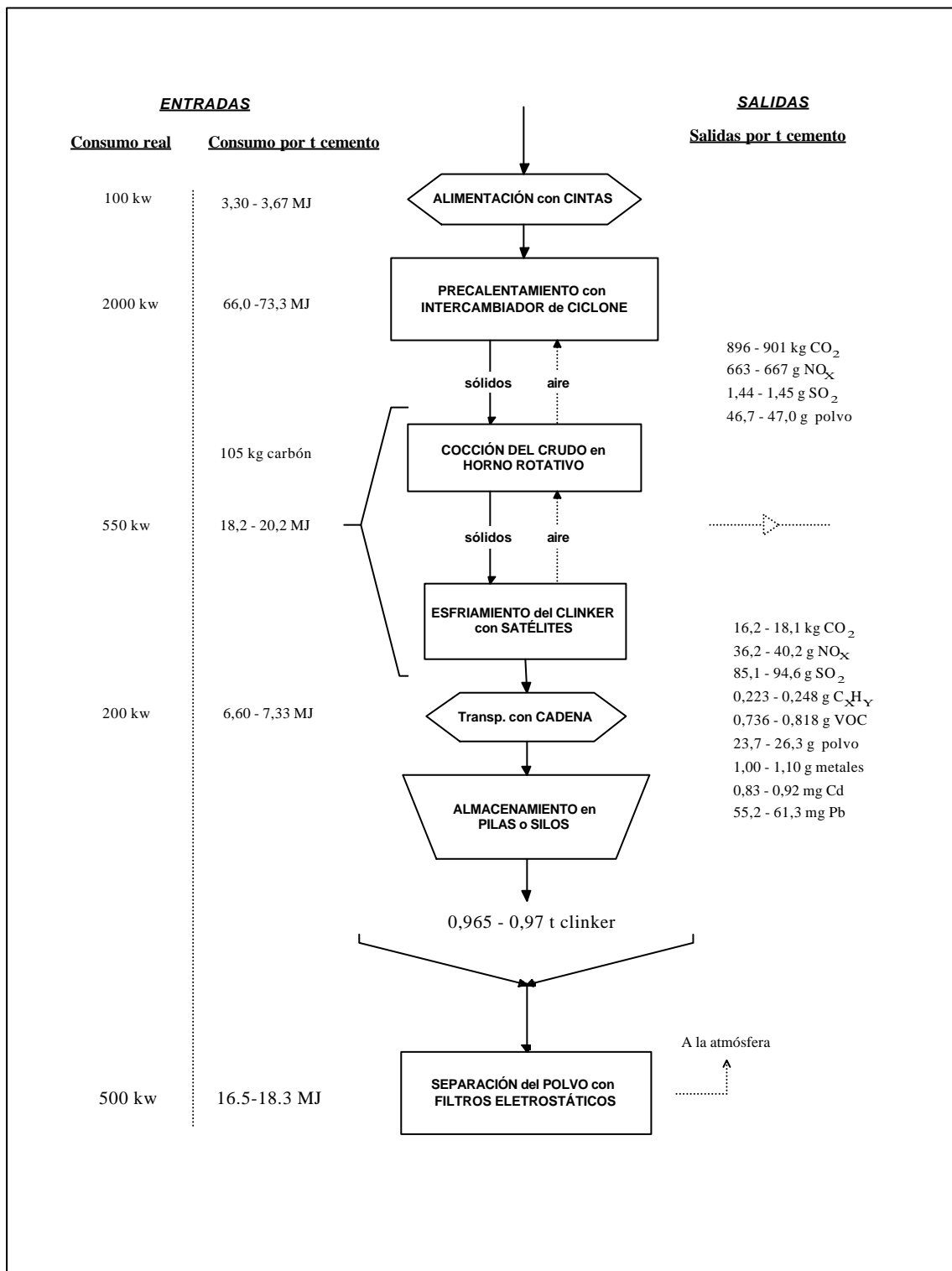
A4.5 -Fase 2.1 – Subsistema COMBUSTIBLE DEL HORNO - Preparación del carbón



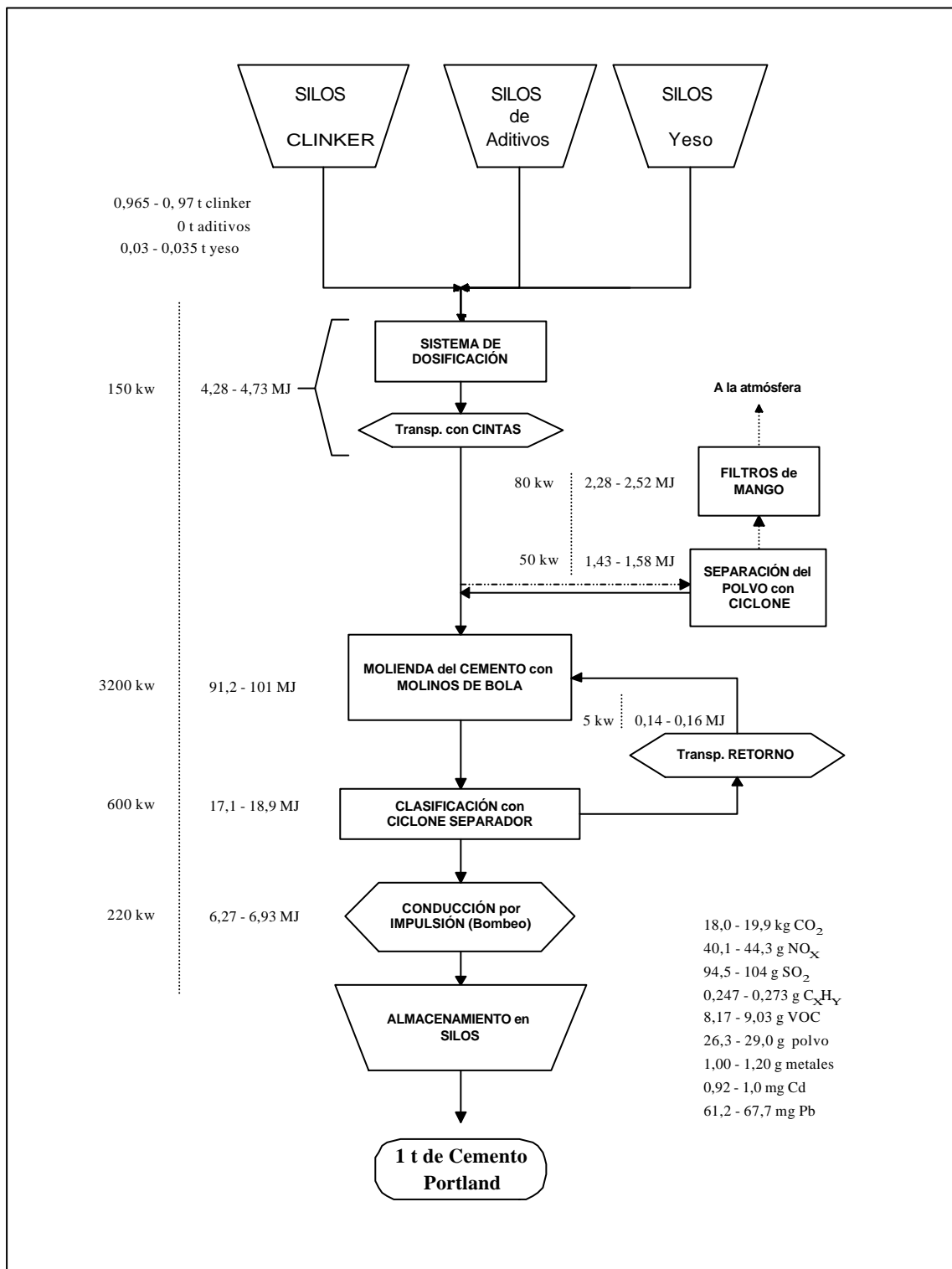
A4.6 - Fase 2.2 – Subsistema PREPARACIÓN DEL CRUDO - Trituración del crudo



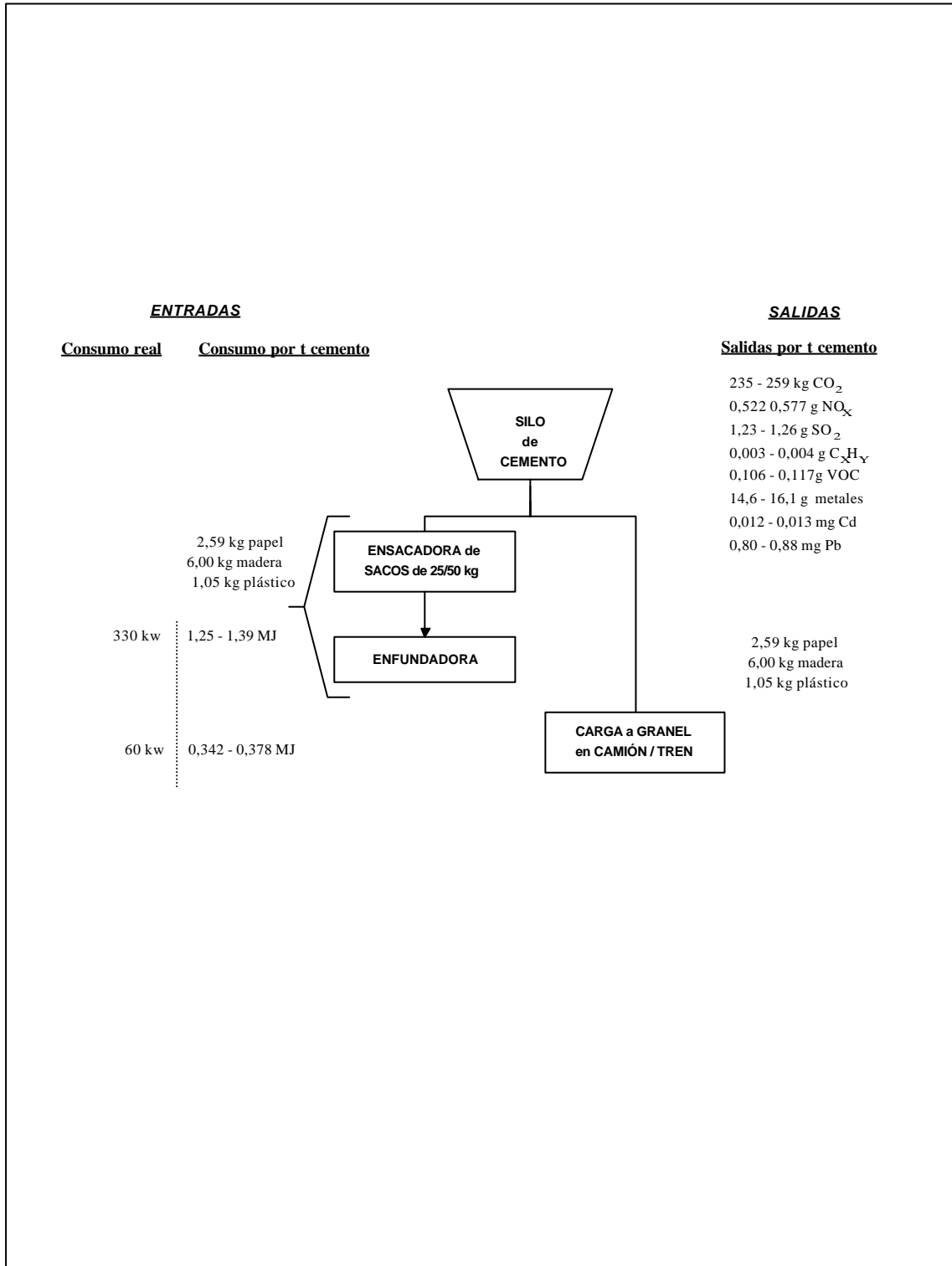
A4.7 - Fase 3 – Subsistema PRODUCCIÓN DEL CLINKER - Cocción del crudo



A4.8 - Fase 4 – Subsistema PRODUCCIÓN DE CEMENTO - Fabricación del cemento



A4.9 – Fase 5 - Subsistema DISTRIBUCIÓN - Expedición del cemento



A4.10 – MEMORIA DE CÁLCULOS

Datos de entrada - Recursos materiales

Cálculos

Para elaborar un inventario, es básico hacer referencia a todos los valores en la misma unidad funcional, para poder los comparar.

En un principio los datos que son proporcionados no vienen necesariamente referenciados a 1 tonelada de cemento portland. Por lo tanto, es necesario que se haga una serie de cálculos de manera que se obtenga el valor en la unidad deseada. Estas operaciones se explican a continuación

Valores de la tabla 6.5

Caliza

$$\frac{0,965-0,97t \text{ clinker}}{1t \text{ cemento}} \times \frac{1,5-1,6t \text{ crudo}}{1t \text{ clinker}} \times \frac{0,65-0,8t \text{ caliza}}{1t \text{ crudo}} = [0,941] [1,24] \frac{t \text{ caliza}}{t \text{ cemento}}$$

Arcilla

$$\frac{0,965-0,97t \text{ clinker}}{1t \text{ cemento}} \times \frac{1,5-1,6t \text{ crudo}}{1t \text{ clinker}} \times \frac{0,10-0,30t \text{ arcilla}}{1t \text{ crudo}} = [0,145] [0,466] \frac{t \text{ arcilla}}{t \text{ cemento}}$$

Arenisca

$$\frac{0,965-0,97t \text{ clinker}}{1t \text{ cemento}} \times \frac{1,5-1,6t \text{ crudo}}{1t \text{ clinker}} \times \frac{0,02-0,10t \text{ arenisca}}{1t \text{ crudo}} = [0,029] [1,55] \frac{t \text{ arenisca}}{t \text{ cemento}}$$

Corrector de Fe

$$\frac{0,965-0,97t \text{ clinker}}{1t \text{ cemento}} \times \frac{1,5-1,6t \text{ crudo}}{1t \text{ clinker}} \times \frac{0,01t \text{ corr.Fe}}{1t \text{ crudo}} = [0,014] [0,016] \frac{t \text{ corr.Fe}}{t \text{ cemento}}$$

Valores de la tabla 6.6

Goma2 – caliza

$$\frac{24g \text{ Goma2}}{1t \text{ caliza}} \times \frac{0,65-0,8t \text{ caliza}}{1t \text{ crudo}} \times \frac{1,5-1,6t \text{ crudo}}{1t \text{ clinker}} \times \frac{0,965-0,97t \text{ clinker}}{1t \text{ cemento}} = [22,6] [29,8] \frac{g \text{ Goma2}}{t \text{ cemento}}$$

Goma2 – arenisca

$$\frac{36g \text{ Goma2}}{1t \text{ arenisca}} \times \frac{0,02-0,1t \text{ arenisca}}{1t \text{ crudo}} \times \frac{1,5-1,6t \text{ crudo}}{1t \text{ clinker}} \times \frac{0,965-0,97t \text{ clinker}}{1t \text{ cemento}} = [1,04] [5.59] \frac{g \text{ Goma2}}{t \text{ cemento}}$$

Anagolita – caliza

$$\frac{96g \text{ Anagolita}}{1t \text{ caliza}} \times \frac{0,65-0,8t \text{ caliza}}{1t \text{ crudo}} \times \frac{1,5-1,6t \text{ crudo}}{1t \text{ clinker}} \times \frac{0,965-0,97t \text{ clinker}}{1t \text{ cemento}} =$$

$$[90,3] [120] \frac{g \text{ Anagolita}}{t \text{ cemento}}$$

Anagolita – arenisca

$$\frac{204g \text{ Anagolita}}{1t \text{ arenisca}} \times \frac{0,02-0,1t \text{ arenisca}}{1t \text{ crudo}} \times \frac{1,5-1,6t \text{ crudo}}{1t \text{ clinker}} \times \frac{0,965-0,97t \text{ clinker}}{1t \text{ cemento}} =$$

$$[5,90] [31,7] \frac{g \text{ Anagolita}}{t \text{ cemento}}$$

Papel

	CEM II/A-L 32.5 R	CEM II/A-L 32.5 R (IBIZA)	CEM II/A-L 32.5 R	CEM I 52.5 R
g papel/saco cemento	130	195	82	67
kg cemento/saco	50	50	25	50
kg papel/t cemento	2,60	3,90	3,28	1,34
Producción (sacos/h)	18.000	200	165	56
Producción (t cem/h)	900	10	4,12	2,8

Tabla A4.1- Datos suministrados referentes al recurso papel

$$\text{Media ponderada: } \frac{2,6 \cdot 900 + 3,9 \cdot 10 + 3,28 \cdot 4,12 + 1,34 \cdot 2,8}{900 + 10 + 4,12 + 2,8} = 2,62 \frac{g \text{ papel}}{t \text{ cemento}}$$

Madera de los palets

- Consumo de 11.000 palets nuevos/año con un contenido de 15 kg de madera
- Consumo de 11.000 palets reparados/año con un contenido de 3 kg de madera
- Capacidad de 30 sacos de 50kg cemento por palet << 1,5 ton cemento/palet
- Capacidad de 56 sacos de 25kg cemento por palet << 1,4 ton cemento/palet

Cálculos

Consumo de madera anual:

$$\frac{11000 \text{ palets_nuevos}}{1 \text{ año}} \times \frac{15kg \text{ madera}}{\text{palet nuevo}} + \frac{11000 \text{ palets_repar.}}{1 \text{ año}} \times \frac{3kg \text{ madera}}{\text{palet_repar.}} = 198000 \frac{kg \text{ madera}}{\text{año}}$$

De la Tabla (tabla A4.1):

Producción de sacos de 50 kg/h: $18.000+200+56 = 18.256$ sacos/h = **912,8 t cemento/h**

Producción de sacos de 25 kg/h: **165 sacos/h = 4,12 t cemento/h**

Media ponderada:

$$\left[\frac{1,5t \text{ cemento}}{\text{palet}} \times \frac{912,8t \text{ cemento}}{\text{hora}} + \frac{1,4t \text{ cemento}}{\text{palet}} \times \frac{4,12t \text{ cemento}}{\text{hora}} \right] \times \frac{1}{(912,8+4,12)} = 1,5 \frac{t \text{ cemento}}{\text{palet}}$$

$$\frac{198000kg \text{ madera}}{22000 \text{ palets}} \times \frac{1 \text{ palet}}{1,5t \text{ cemento}} = 6 \frac{kg \text{ madera}}{t \text{ cemento}}$$

Plástico

1 bolsa de plástico para enfundar los sacos del palet = 1,57 kg plástico / bolsa

Cálculo

$$\frac{1 \text{ bolsa}}{1 \text{ palet}} \times \frac{1 \text{ palet}}{1,5t \text{ cemento}} \times \frac{1,5kg \text{ plastico}}{1 \text{ bolsa}} = 1,00 \frac{kg \text{ plastico}}{t \text{ cemento}}$$

Recursos energéticos

Cálculos

Nuevamente para pasar los datos suministrados a los resultados por tonelada de cemento portland se precisa hacer una serie de cálculos. Seguidamente se expone un ejemplo para cada mecanismo seguidos de las tablas donde se recogen los resultados obtenidos, de forma detallada y desglosadas en las fases de fabricación (tablas de la A4.2 hasta la A4.12).

Consumo máximo de la perforadora de arenisca

$$\frac{40 \text{ l/h gasóleo}}{100 \frac{t \text{ arenisca}}{h \text{ producción}}} \times \frac{0,10t \text{ arenisca}}{1t \text{ crudo}} \times \frac{1,6t \text{ crudo}}{1t \text{ clinker}} \times \frac{0,97t \text{ clinker}}{1t \text{ cemento}} = 0,062 \frac{l \text{ gasóleo}}{t \text{ cemento}}$$

Consumo máximo de la trituradora de arcilla

$$\frac{350kw}{300 \frac{t \text{ arcilla}}{h \text{ producción}}} \times \frac{3,6MJ}{1kwh} \times \frac{0,30t \text{ arcilla}}{1t \text{ crudo}} \times \frac{1,6t \text{ crudo}}{1t \text{ clinker}} \times \frac{0,97t \text{ clinker}}{1t \text{ cemento}} \times 1,05 = 2,05 \frac{MJ}{t \text{ cemento}}$$

(el 5% de la variación energética)

Consumo máximo del transporte en camión de la caliza

$$\text{Consumo 1 viajen a/t} = 45 \text{ min} \times \frac{48 \text{ l}}{60 \text{ min}} = 36 \frac{\text{l gasóleo}}{\text{viajen a/t}}$$

$$\text{Volumen transportado 1 viajen a/t} = 15 \text{ m}^3 \text{ capacidad camión} \times \frac{2,65 \text{ t caliza}}{\text{m}^3} = 40 \text{ t caliza}$$

$$\frac{36 \text{ l gasóleo}}{\text{viajen a/t}} \times \frac{1 \text{ viajen a/t}}{40 \text{ t caliza}} \times \frac{1,24 \text{ t caliza}}{\text{t cemento}} = 1,12 \frac{\text{l gasóleo}}{\text{t cemento}}$$

Consumo mínimo del quemador del horno

$$\frac{0,1085 \text{ t combustible}}{\text{t clinker}} \times \frac{0,965 - 0,97 \text{ t clinker}}{\text{t cemento}} \times \frac{7600 \text{ kcal}}{\text{kg combustible}} \times \frac{4186,8 \text{ E-}6 \text{ MJ}}{\text{l kcal}} = 3322 \text{ MJ/t cem.}$$

EXPLOTACIÓN CANTERA			Perforadora	Martillo Hidráulico	Pala Cargadora	Excavadora hidráulica	Dúmper
GASÓLEO (consumo l/h)			40	60	50	85	25
CALIZA	consumo l/t caliza	máx	0,073	0,109	0,091	0,155	0,045
		mín	0,062	0,092	0,077	0,131	0,038
	consumo l/t Cemento	máx	0,090	0,135	0,113	0,192	0,056
		mín	0,058	0,087	0,072	0,123	0,036
ARCILLA	consumo l/t arcilla	máx	-	-	0,250	0,425	-
		mín	-	-	0,200	0,340	-
	consumo l/t Cemento	máx	-	-	0,116	0,198	-
		mín	-	-	0,029	0,049	-
ARENISCA	consumo l/t arenisca	máx	0,400	-	0,500	0,850	-
		mín	0,320	-	0,400	0,680	-
	consumo l/t Cemento	máx	0,062	-	0,078	0,132	-
		mín	0,009	-	0,012	0,020	-

Tabla A4.2 - Consumo de gasóleo en las tres canteras

TRANSPORTE EN CAMIONES		Caliza	Arcilla	Arenisca	Corrector Fe
Densidad media (g/cm ³)		2,65	2,00	2,36	2,00
Tempos de viajen a/t (min)		45	12	15	45
Consumo (l/h)		48			
Consumo l / t CEMENTO	max	1,12	0,149	0,052	0,019
	mín	0,852	0,046	0,010	0,017

Tabla A4.3 - Consumo de gasóleo para el transporte de árido de las canteras a la fabrica

TRITURACIÓN CALIZA		Cinta	Tritu radora	Cinta	Criba Vibrantes	Cinta	Filtros de mangos	Tritu radora	
Consumo (kw)		50	940	57	38	20	145	650	
Producción		t/h caliza							
		550 - 650							250
Consumo MJ / t caliza	máx	0,327	6,15	0,373	0,245	0,131	0,949	9,36	
	mín	0,277	5,21	0,316	0,208	0,111	0,803	9,36	
Consumo MJ / t CEMENTO	máx	0,427	8,02	0,486	0,320	0,171	1,24	12,2	
	mín	0,248	4,65	0,282	0,186	0,099	0,718	8,37	

Tabla A4.4 - Consumo de energía eléctrica (MJ) de la maquinaria de la fase: Trituración de caliza

PREHOMO CALIZA		Cinta apiladora	Rascador	Cinta
Consumo (kw)		50	50	10
Producción		t/h caliza		
		300		
Consumo MJ / t caliza		0,600	0,600	0,120
Consumo MJ / t CEMENTO	máx	0,782	0,782	0,156
	mín	0,536	0,536	0,107

Tabla A4.5 - Consumo de energía eléctrica (MJ) de la maquinaria de la fase: Prehomogenización de la caliza.

TRITURACIÓN Y PREHOMO. ARCILLA		Trituradora	Cinta	"Noria de cangilones"	Cinta
Consumo (kw)		350	30	7,5	40
Producción		t/h arcilla			
		300	200		
Consumo MJ / t arcilla		4,20	0,540	0,135	0,720
Consumo MJ / t CEMENTO	máx	2,05	0,264	0,066	0,352
	mín	0,578	0,074	0,019	0,099

Tabla A4.6 - Consumo de energía eléctrica (MJ) de la maquinaria de la fase: Prehomogenización de la arcilla.

TRATAMIENTO DE LA ARENISCA Y CORRECTOR Fe		Trituradora Arenisca	Transporte Arenisca	Transporte Corr: Fe
Consumo (kw)		214	22	22
Producción		t/h aren.	t/h crudo	
		125	200	
Consumo MJ / t aren. o corr. Fe		6,16	0,396	0,396
Consumo MJ / t CEMENTO	máx	1,00	0,645	0,645
	mín	0,170	0,545	0,545

Tabla A4.7- Consumo de energía eléctrica (MJ) de la maquinaria de las fases Tratamiento de la areniscas y del corrector de hierro.

TRITURACIÓN DEL CRUDO		Cintas del silos	Secador de material	Ciclone separador	Filtro de mangos	Molino de crudo	Elevador	Ciclone clasificador	cinta de retorno	Conducción impulsión
Consumo (kw)		46	0	800	80	3200	100	360	2	380
Producción		t/h crudo 200								
Consumo MJ / t crudo		0,828	0	14,4	1,44	57,6	1,80	6,48	0,036	6,84
Consumo MJ / t CEMENTO	máx	1,35	0	23,5	2,35	93,9	2,93	10,6	0,059	11,1
	mín	1,14	0	19,8	1,98	79,2	2,48	8,91	0,050	9,41

Tabla A4.8 - Consumo de energía eléctrica (MJ) de la maquinaria de la fase: Trituración del crudo.

COCCIÓN DEL CRUDO		Silo de homogenización y Alimentación del horno	Pre-calentador	Horno rotativo + Refrigerador	Cadena al silo	Filtros Electrostaticos
Consumo (kw)		100	2000	550	200	500
Producción		t/h clinker 100				
Consumo MJ / t clinker		3,60	72,0	19,8	7,20	18,0
Consumo MJ / t CEMENTO	máx	97,0	73,3	20,2	7,33	18,3
	mín	3,30	66,0	18,2	6,60	16,5

Tabla A4.9 - Consumo de energía eléctrica (MJ) de la maquinaria de la fase: Cocción del crudo.

PREPARACIÓN DEL CEMENTO		Sistema de dosificación	Ciclone separador	Filtro de mangos	Molino de cemento	cinta de retorno	Ciclone clasificador	Conducción impulsión
Consumo (kw)		150	50	80	3200	5	600	220
Producción		t/h cemento 120						
Consumo MJ / t cemento		4,50	1,50	2,40	96,0	0,150	18,0	6,60
Consumo MJ / t CEMENTO	máx	4,73	1,58	2,52	100,8	0,158	18,9	6,93
	mín	4,28	1,43	2,28	91,2	0,143	17,1	6,27

Tabla A4.10 - Consumo de energía eléctrica (MJ) de la maquinaria de la fase: Preparación de cemento

EXPEDICIÓN DEL CEMENTO		Ensacadora + enfundadora	Cargador a granel
Consumo (kw)		330	60
Producción		t/h cemento	
		900	600
Consumo MJ / t cemento		1,32	0,360
Consumo MJ / t CEMENTO	máx	1,39	0,378
	mín	1,25	0,342

Tabla A4.11 -Consumo de energía eléctrica (MJ) de la maquinaria de la fase: Expedición del cemento

PREPARACIÓN DEL CARBÓN		Proceso
Consumo (kw)		1300
Producción		t/h carbón
		35
Consumo MJ / t carbón		134
Consumo MJ / t CEMENTO	máx	14,78
	mín	13,30

Tabla A4.12 - Consumo de energía eléctrica (MJ) de la maquinaria de la fase: Preparación del carbón.

A4.11 - Emisiones medidas en cinco controles puntuales

Esto son los valores medidos en cinco mediciones diferentes realizadas por el laboratorio contratado por la fabrica en estudio. Las muestras se han tomados de los gases del horno de clinker en la salida de la chimenea, cuando ya ha pasado por el filtro electroestático y se liberan a la atmósfera. Los compuestos medidos son: *óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y partículas de polvo.*

Muestra	NOx (mg/Nm ³)	SO ₂ (mg/Nm ³)	Polvo (mg/Nm ³)
1	448	<0,02	13,0
2	271	<0,09	18,7
3	278	<0,09	32,3
4	199	2,7	12,9
5	512	<0,82	43,8

Tabla A4.13 - Emisiones durante las reacciones químicas en el horno

		España	Holanda	Noruega	Suecia	Suiza	Finlandia
CO2	mg	147000	208	1,19	17,7	27,5	112
NOx	mg	327	454	2,63	41	62	265
SO2	mg	770	530	6,45	165	148	616
CxHy	mg	2,02	1,77	0,015	0,334	0,374	1,56
VOC	mg	66,6	47,7	1,32	37,1	18,4	97
Polvo	mg	214	177	0,741	12,5	35,8	120
Metales	mg	9,13	7,68	0,038	0,654	1,49	5,75
Cd	mg	0,008	0,006	6,2E-05	0,002	0,007	0,002
Pb	mg	0,499	0,517	0,002	0,077	0,007	0,035

Tabla A4.14 – Emisiones al aire de sustancias correspondientes a las matrices energéticas de diferentes países.

A4.12 - Indicadores de categoría originados en las fuentes energéticas

Gasóleo	Cantidad (g)	Efecto invernadero			Acidificación			Eutrofización			Cont.verano			Cont. Invierno			Metales pesados		
		Factor	CO ₂ equiv.	%	Factor	SO ₂ equiv.	%	Factor	PO ₄ equiv.	%	Factor	C ₂ H ₄ equiv.	%	Factor	SPM equiv.	%	Factor	Pb equiv.	%
Emisiones al aire																			
CO ₂	3408,867	1	3408,9	100%															
NOx	52,709				0,7	36,896	88%	0,13	6,8522	100%									
SO ₂	5,044				1	5,044	12%						1	5,044	52%				
CxHy	10,739										0,398	4,2741	89%						
Hollín	4,286												1	4,286	44%				
Metales	0,0001															1	0,0001	15%	
Cd	7,1E-06															50	4E-04	53%	
Pb	0,0002143															1	0,0002	32%	
Polvo	0,340												1	0,34	4%				
Otros	2,9350										0,1727	0,507	11%						

Tabla A4.15 – Caracterización de las emisiones durante la producción y consumo de gasóleo

Electricidad	Cantidad	Efecto invernadero			Acidificación			Eutrofización			Cont.verano			Cont. Invierno			Metales pesados		
		Factor	CO ₂ equiv.	%	Factor	SO ₂ equiv.	%	Factor	PO ₄ equiv.	%	Factor	C ₂ H ₄ equiv.	%	Factor	SPM equiv.	%	Factor	Pb equiv.	%
Emissiones al aire	(g)																		
CO ₂	147,000	1	147	100%															
NOx	0,327				0,7	0,2289	23%	0,13	0,0425	99%									
SO ₂	0,770				1	0,77	77%						1	0,77	78%				
VOC	0,0666										0,398	0,0265	88%						
Metales	0,00913															1	0,0091	98%	
Polvo	0,214												1	0,214	22%				

Tabla A4.16 – Caracterización de las emisiones durante la producción y consumo de energía eléctrica