



**UNCUYO**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE CUYO



**FACULTAD  
DE INGENIERÍA**

DOCTORADO EN INGENIERÍA

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA  
EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO AMBIENTAL DE  
SISTEMAS DE GESTIÓN DE RESIDUOS DE  
CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

IRMA TERESA MERCANTE  
TESIS DOCTORAL

Director: Dr. Ing. Alejandro Pablo Arena

Co-Directora: Dra. Ing. María Dolores Bovea

Mendoza. Abril, 2014

ISBN 978-987-27642-3-4



# Índice General

Reconocimientos.....	v
Dedicatoria.....	vii
Resumen.....	ix
Abstract.....	xi
Índice de Contenido .....	xiii
Índice de Figuras.....	xix
Índice de Tablas .....	xxiii
Lista de Abreviaturas .....	xxvii
Contenido.....	1
Referencias .....	217
Anexos .....	229



## **Reconocimientos**

Durante el camino recorrido para la elaboración de esta tesis he contado con el apoyo y la colaboración de un gran equipo de trabajo: personas e instituciones han hecho que este proyecto llegara a esta instancia.

En primer lugar, dedico estas palabras al Dr. Ing. Alejandro Pablo Arena, quien ha dirigido desde el comienzo esta investigación, me ha brindado su guía y me ha alentado en momentos cruciales, aportando su experiencia y rigurosos criterios en este trabajo.

Una distinción muy especial dedico a la Dra. Ing. María Dolores Bovea, quien desde la co-dirección de esta tesis, me ha concedido valiosos aportes con paciencia y dedicación. Me facilitó, además, una fase importante de la investigación recibíendome en el grupo INGRES de la Universidad Jaume I en España.

Agradezco al Dr. Ing. Jorge Horacio Barón, por motivar el crecimiento académico y profesional en todo momento.

Deseo expresar mi enorme gratitud hacia mi colega y amiga Susana Llamas, por su constante estímulo y aliento en la culminación de esta etapa. Extensivamente, agradezco a los integrantes del Centro de Estudios de Ingeniería de Residuos Sólidos de la Universidad Nacional de Cuyo, por brindarme su apoyo incondicional: a Aldo, Pablo y el resto del equipo.

En la lista de colaboraciones académicas agradezco a quienes desinteresadamente me aportaron su conocimiento, sus técnicas de trabajo y su tiempo en revisiones: Ricardo Césari, Guillermo Reta, Cecilia Rubio, José Bardotti, Bárbara Civit, Valeria Ibañez-Forés.

Un agradecimiento especial a los miembros de la Red de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (REDISA), con quienes pude compartir reuniones científicas que aportaron distintos elementos de la realidad iberoamericana a esta investigación.

A los responsables de las empresas que facilitaron los datos para elaborar este trabajo por su disposición y confianza: Juan Costa (Tecnología y Reciclado S. L.), José Morales (Tratamiento de Residuos Inertes S.L.), Enrique Granell (Concretos Reciclados S.A.), Lucio Agnic y Alexis Atem (Empresas de contenedores), Laura Coronado (Gemersa) y Sandra Bernat (Traimed 21), dedico también mis reconocimientos.

Agradezco a la Fundación YPF de Argentina por la beca otorgada durante los años que duró la investigación.

Al finalizar, y con todo cariño, agradezco a mi familia y a todos los que, de algún modo, han entendido mis ausencias, brindado su amor y comprensión.



A Francisco, Luana, Satia y Ailen,  
porque siempre crean que es posible...



## **Resumen**

Desde mediados de la década de los años '90 se ha adquirido conciencia sobre la pérdida de oportunidad de preservar recursos naturales y sobre los problemas de contaminación originados por la gestión inadecuada de los residuos de construcción y demolición (RCD). Esto ha provocado la creación de una línea de investigación sobre esta temática. Sin embargo, aún es incipiente y existe un importante déficit en cuanto al desarrollo de métodos y herramientas que permitan evaluar estrategias de gestión de RCD y determinar su efectividad, desde una óptica de ciclo de vida. Esta carencia incluye todas las regiones del planeta, y cobra particular relevancia en la región latinoamericana, donde los sistemas de gestión de RCD son incipientes.

Este panorama determinó el objetivo general de la tesis: desarrollar metodologías y herramientas que permitan analizar, desde una perspectiva de ciclo de vida, el desempeño ambiental de sistemas integrados de gestión de RCD, del cual derivaron los objetivos específicos.

Las actividades realizadas para lograr los objetivos propuestos se iniciaron con el estudio y análisis de los sistemas de gestión de RCD implementados a nivel local, nacional e internacional. Se identificaron las etapas principales, las variables y procesos involucrados en cada una, su relación e interdependencia con miras a aplicar técnicas de análisis de ciclo de vida y obtener indicadores que permitan cuantificar el desempeño ambiental de los mismos. Por otra parte, se realizaron estudios de generación de RCD, una información imprescindible en los datos de entrada al sistema.

El principal aporte de esta tesis es la propuesta de una metodología para la evaluación ambiental de sistemas de gestión integral de RCD (SGIRCD) con técnicas de análisis de ciclo de vida. Ésta permite obtener el perfil ambiental del sistema de forma global y por etapas, y es aplicable en cualquier país o región. Este perfil considera una selección de las categorías de impacto que fueron detectadas como las más adecuadas para la evaluación ambiental de un SGIRCD. Este estudio se llevó a cabo a nivel general y se profundizó para la región de Mendoza, Argentina. El resultado es un conjunto de seis categorías de impacto.

El proceso de análisis de la generación de RCD derivó en aporte adicional, que consiste en un procedimiento directo para determinar la composición de los RCD con base en un método estadístico de muestreo.

Otra contribución importante es la elaboración de inventarios de ciclo de vida para cada etapa del ciclo de vida del sistema de gestión, tarea que insumió un importante esfuerzo de recopilación de datos primarios mediante consultas a empresas gestoras de RCD, y su posterior procesamiento desde los datos agregados anuales obtenidos, hasta su asignación a proceso unitario.

Finalmente, con el fin de facilitar la aplicación de la metodología propuesta se diseñó una herramienta informática, denominada ACV-RCD. El programa incluye datos de inventario por defecto para Argentina, y brinda la posibilidad de modificarlos fácilmente para considerar realidades de otros países, o de otras tecnologías aún por desarrollar. Esta herramienta facilitó poner a prueba y validar la metodología propuesta en esta Tesis, al aplicarla a distintos casos de estudio de España y de Argentina.



## **Abstract**

Since mid '90 it has become aware of the loss of opportunity to preserve natural resources and pollution problems caused by improper construction and demolition waste (C&DW) management. This has led to the creation of a line of research on this subject. However, it is still incipient and there is a deficit in the development of methods and tools to evaluate management strategies C&DW and to determine their effectiveness, from a life cycle perspective. This gap includes all regions of the planet, and it is particularly relevant in Latin America, where C&DW management systems are emerging.

This situation determined the general aim of the thesis: to develop methodologies and tools to analyze, from a life cycle perspective, the environmental performance of integrated management systems C&DW, from which derived the specific objectives.

Activities undertaken to achieve the objectives began with the study and analysis of the C&DW management systems implemented at local, national and international level. The main stages, the variables and processes involved in each one, their relationship and interdependence in order to apply life cycle assessment (LCA) techniques and to provide indicators to quantify the environmental performance of these were identified. Moreover, studies of C&DW generation were performed, an essential input information data to the system.

The main contribution of this Thesis is the proposal of a methodology for the environmental assessment of integrated C&DW management systems with life cycle assessment techniques. This allows to obtain the environmental profile of the system as a whole and in stages, and it is applicable in any country or region. This profile considers a selection of impact categories that were identified as the most suitable for the environmental assessment of integrated C&DW management systems. This study was conducted at a general level and deepened for the region of Mendoza, Argentina. The result is a set of six categories of impact.

The process of generating C&DW study resulted in additional contribution, which consists of a direct method for determining the composition of the C&DW based on a statistical sampling method.

Another important contribution is the development of life cycle inventories for each stage of the life cycle management system, a work that took a significant effort in collecting primary data by surveying RCD management companies, and further processing from the annual aggregates data obtained until assignment to unit process.

Finally, in order to facilitate the implementation of the proposed methodology a software tool, called LCA-C&DW, was designed. The program includes default inventory data for Argentina, and provides the ability to easily modify them to consider realities of other countries or other technologies yet to be developed. This tool enables to test and validate the proposed methodology in this thesis, when applied to different case studies from Spain and Argentina.



## Índice de Contenido

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO .....	1
1.1.Los residuos sólidos: la gestión sostenible.....	1
1.1.1.Concepto de gestión integral de residuos sólidos .....	3
1.1.2.La jerarquía de residuos y el enfoque integral .....	6
1.2.Residuos de construcción y demolición: RCD.....	7
1.2.1.Clasificación de RCD .....	8
1.2.2.Caracterización de RCD .....	9
1.2.3.Problemas ambientales derivados de los RCD .....	11
1.2.3.1.Impactos sobre el medio físico y biótico .....	12
1.2.3.2.Impactos sobre el medio perceptual.....	14
1.2.3.3.Impactos sobre el medio socioeconómico .....	14
1.2.3.4.Pérdida de materiales recuperables.....	15
1.2.4.Opciones de valorización de los RCD .....	15
1.2.4.1.Reutilización .....	15
1.2.4.2.Reciclaje .....	16
1.2.4.3.Recuperación de áreas .....	20
1.2.4.4.Valorización energética .....	20
1.3.Aspectos normativos relativos a los RCD.....	21
1.3.1.Europa.....	21
1.3.1.1.España.....	25
1.3.2.Estados Unidos de Norteamérica.....	28
1.3.3.Países de América Latina.....	28
1.3.3.1.Argentina .....	28
1.3.3.2.Brasil.....	29
1.3.3.3.México .....	31
1.3.3.4.Chile.....	32
1.4.Elementos de la gestión integral de los RCD .....	32
1.4.1.Recogida .....	33
1.4.2.Transporte .....	35
1.4.3.Instalaciones de tratamiento.....	35
1.4.3.1.Plantas de clasificación de RCD y reproceso de inertes .....	36
1.4.3.2.Planta de reproceso de madera.....	36
1.4.3.3.Instalaciones de recuperación de áreas degradadas .....	37
1.4.3.4.Instalaciones de valorización energética de la madera .....	37
1.4.4.Disposición final .....	37
1.5.Metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) .....	39
1.5.1.Definición de objetivos y alcance .....	40
1.5.2.Análisis del Inventario de Ciclo de Vida (ICV).....	41
1.5.3.Evaluación del Impacto de ciclo de vida (EICV) .....	42
1.5.4.Interpretación de resultados .....	44
1.6.Aplicación de la metodología de ACV a la gestión de los residuos sólidos .....	44
1.6.1.Definición de objetivos y alcance del ACV en los sistemas de residuos.....	46
1.6.2.Inventario del ciclo de vida de los residuos .....	48
1.6.3.Evaluación de impacto del ciclo de vida de los residuos.....	48

1.6.4. Interpretación de resultados en ACV de residuos.....	49
1.7. Herramientas informáticas de ACV aplicadas a la gestión de los RCD .....	49
1.8. Tendencias internacionales de las líneas de investigación en torno a los RCD .....	51
1.9. Conclusiones del Capítulo.....	52
CAPÍTULO 2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS .....	53
2.1. Justificación de la investigación y formulación del problema .....	53
2.1.1. Problemática de la evaluación ambiental de los SGIRCD.....	53
2.1.2. Preguntas de la investigación.....	55
2.2. Hipótesis.....	55
2.3. Objetivos .....	55
2.3.1. Objetivo general.....	56
2.3.2. Objetivos específicos .....	56
2.4. Metodología .....	56
CAPÍTULO 3. GENERACIÓN DE RCD. DATOS DE CARACTERIZACIÓN .....	59
3.1. Introducción .....	59
3.2. Caracterización de RCD en obras civiles de edificación .....	60
3.3. Caracterización de RCD a nivel regional.....	61
3.3.1. Métodos indirectos.....	62
3.3.2. Métodos directos.....	63
3.3.2.1. Caracterización de RCD en plantas de clasificación .....	63
3.3.2.2. Caracterización de RCD en el sitio de origen.....	64
3.4. Diseño de un método directo para obtener la composición de RCD a nivel regional.....	64
3.4.1. Generalidades sobre estimación de parámetros .....	64
3.4.2. Selección de la muestra y cálculo de estimadores .....	65
3.4.3. Procedimiento para la obtención de los datos de composición.....	69
3.5. Caso de aplicación: Gran Mendoza.....	69
3.5.1. Determinación del número de muestras para el cálculo de la composición .....	70
3.6. Conclusiones del Capítulo.....	72
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN AMBIENTAL DE SISTEMAS DE GESTIÓN DE RCD CON TÉCNICAS DE ACV.....	73
4.1. Descripción y límites del ciclo de vida de un sistema de gestión de RCD .....	73
4.1.1. Sistema de gestión de RCD simplificado.....	75
4.2. Metodología de trabajo .....	76
4.3. Entrada de residuos: datos de generación .....	78
4.4. ACV de la etapa Recogida .....	78
4.4.1. Objetivos, alcance y unidad funcional de la etapa Recogida.....	79
4.4.2. Datos de inventario de ciclo de vida de la etapa Recogida.....	81
4.4.3. Evaluación de impacto de ciclo de vida de la etapa Recogida.....	82
4.4.4. Interpretación de resultados de la Recogida .....	85
4.5. ACV de la etapa Transporte.....	85
4.5.1. Objetivos, alcance y unidad funcional de la etapa Transporte.....	86
4.5.2. Datos de inventario del ciclo de vida del Transporte.....	86
4.5.3. Evaluación de impacto del ciclo de vida del Transporte .....	88
4.5.4. Interpretación de resultados de la etapa Transporte.....	90
4.6. ACV de la etapa de Tratamiento: Clasificación de RCD y reproceso de inertes .....	90

4.6.1.Objetivos, alcance y unidad funcional de la etapa Tratamiento: Clasificación de RCD y reproceso de inertes .....	94
4.6.2.Datos de inventario del Tratamiento: Clasificación de RCD y reproceso de inertes .....	95
4.6.3.Evaluación de impacto de ciclo de vida de la etapa Tratamiento: Clasificación de RCD y reproceso de inertes .....	99
4.6.4.Interpretación de resultados de la etapa Tratamiento: Clasificación de RCD y reproceso de inertes .....	102
4.7.ACV de la etapa de Tratamiento: Reciclaje .....	103
4.7.1.Objetivos, alcance y unidad funcional de la etapa Tratamiento: Reciclaje.....	104
4.7.2.Datos de inventario de la etapa Tratamiento: Reciclaje.....	106
4.7.3.Evaluación de impacto de ciclo de vida de la etapa Tratamiento: Reciclaje ....	110
4.7.4.Interpretación de resultados de la etapa Tratamiento: Reciclaje.....	112
4.8.ACV de la etapa de Tratamiento: Recuperación de áreas .....	112
4.8.1.Objetivos, alcance y unidad funcional de la etapa Tratamiento: Recuperación de áreas .....	113
4.8.2.Datos de inventario de la etapa Tratamiento: Recuperación de áreas.....	114
4.8.3.Evaluación de impacto de ciclo de vida de la etapa Tratamiento: Recuperación de áreas .....	115
4.8.4.Interpretación de resultados de la etapa Tratamiento: Recuperación de áreas.....	116
4.9.ACV de la etapa Disposición Final: Vertido.....	116
4.9.1.Objetivos, alcance y unidad funcional de la etapa Disposición Final: Vertido.....	117
4.9.2.Datos de inventario de la Disposición final: Vertido.....	117
4.9.3.Evaluación de impacto de ciclo de vida de la etapa Disposición final: Vertido.....	118
4.9.4.Interpretación de resultados de la etapa Disposición final: Vertido .....	119
4.10.Combinación de etapas del SGIRCD: generación de escenarios .....	119
4.11.Conclusiones del Capítulo.....	120

## CAPÍTULO 5. CATEGORÍAS DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA APLICADAS A LA GESTIÓN DE RCD .....

5.1.Aspectos generales sobre la de evaluación de impactos ambientales en el ACV .....	123
5.2.Categorías de impacto frecuentemente utilizadas en la aplicación del ACV .....	124
5.2.1.Calentamiento global .....	124
5.2.2.Acidificación.....	125
5.2.3.Eutrofización.....	125
5.2.4.Formación de foto-oxidantes .....	126
5.2.5.Agotamiento del recurso abiótico .....	126
5.2.6.Disminución del ozono estratosférico.....	127
5.2.7.Toxicidad humana.....	127
5.2.8.Ecotoxicidad .....	128
5.2.9.Impacto por uso del suelo .....	128
5.2.10.Impacto por uso del agua .....	129
5.3.Selección de categorías de impacto en el ACV de la gestión de RCD .....	129
5.3.1.Categorías de impacto incluidas en ACV de gestión de residuos.....	130
5.3.2.Análisis de categorías de impacto según el ICV de la gestión de los RCD .....	132

5.4.Indicador de impacto de uso del suelo en tierras secas .....	134
5.4.1.Conceptos generales de la categoría de impacto Desertificación .....	134
5.4.2.Variables involucradas en el indicador de Desertificación .....	135
5.5.Indicador de Desertificación en la gestión de los RCD.....	137
5.5.1.Indicador de Desertificación en Plantas de Clasificación y Reproceso de inertes. ....	138
5.5.2.Indicador de Desertificación en Recuperación de áreas y Vertido .....	139
5.5.3.Caso de aplicación en Las Heras, Mendoza.....	140
5.5.3.1.Antecedentes y descripción del caso .....	140
5.5.3.2.Definición de objetivos y alcance .....	144
5.5.3.3.Datos de inventario de ciclo de vida.....	144
5.5.3.4.Evaluación del impacto del ciclo de vida .....	148
5.5.3.5.Interpretación de resultados .....	149
5.6.Conclusiones del Capítulo.....	149
CAPÍTULO 6. DISEÑO DE LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA ACV-RCD .....	151
6.1.Diseño conceptual de la herramienta .....	150
6.2.Condiciones y requisitos de la herramienta.....	152
6.2.1.Condiciones en relación a las fracciones de residuo consideradas .....	153
6.2.2.Condiciones determinadas por los esquemas de recogida .....	154
6.2.3.Condiciones referidas al transporte de los RCD .....	155
6.2.4.Condiciones relativas a instalaciones de gestión incluidas.....	156
6.2.5.Condiciones relativas a sistemas de gestión de RCD .....	157
6.2.6.Condiciones referidas a la mecánica operativa de la herramienta .....	158
6.3.Descripción general de la herramienta ACV-RCD .....	161
6.3.1.Aplicaciones posibles .....	161
6.3.2.Usuarios potenciales .....	161
6.3.3.Objetivo de la herramienta ACV-RCD.....	162
6.3.4.Lcances y limitaciones .....	162
6.3.5.Unidad funcional.....	162
6.3.6.Configuración de los datos de entrada .....	162
6.3.7.Configuración de los datos de salida .....	163
6.3.8.Datos por defecto.....	164
6.3.8.1.Composición de RCD .....	164
6.3.8.2.Eficiencias de la clasificación y reproceso .....	164
6.3.8.3.Indicadores ambientales.....	165
6.3.9.Datos de inventario primarios modificables en la base de datos del sistema....	166
6.3.9.1.Datos de inventario referidos a contenedores .....	166
6.3.9.2.Datos de inventario referidos a transporte .....	169
6.4.Conclusiones del Capítulo.....	170
CAPÍTULO 7. CASOS DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN AMBIENTAL .....	173
7.1.Evaluación de sistemas de gestión de RCD establecidos en España .....	173
7.1.1.Descripción de los sistemas evaluados .....	173
7.1.2.Objetivos, alcance y unidad funcional .....	175
7.1.3.Análisis de inventario del ciclo de vida .....	176
7.1.4.Evaluación del impacto de ciclo de vida.....	186

7.1.5. Interpretación de Resultados .....	191
7.2. Evaluación del sistema de gestión de RCD en Mendoza, Argentina .....	192
7.2.1. Objetivos, alcance y unidad funcional .....	192
7.2.2. Análisis de inventario de ciclo de vida .....	193
7.2.3. Evaluación del impacto del ciclo de vida .....	199
7.2.4. Interpretación de Resultados .....	205
7.3. Evaluación del fin de vida de los RCD en una obra de edificación .....	205
7.3.1. Descripción del caso .....	205
7.3.2. Objetivo, alcance y unidad funcional .....	207
7.3.3. Inventario de ciclo de vida .....	207
7.3.4. Evaluación del impacto de ciclo de vida .....	207
7.3.5. Interpretación de resultados .....	208
7.4. Conclusiones del Capítulo .....	209
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS .....	211
8.1. Introducción .....	211
8.2. Conclusiones .....	212
8.2.1. Conclusiones respecto a la metodología de evaluación ambiental de SGIRCD .....	212
8.2.2. Conclusiones relativas a la caracterización de RCD .....	212
8.2.3. Conclusiones relativas a los inventarios de ciclo de vida de SGIRCD .....	213
8.2.4. Conclusiones referentes a las categorías de impacto de SGIRCD .....	213
8.2.5. Conclusiones acerca del programa informático ACV-RCD .....	214
8.2.6. Conclusiones sobre la aplicación de la metodología y la herramienta ACV-RCD en casos de estudio .....	214
8.3. Futuras investigaciones .....	216



## Índice de Figuras

### CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

<b>Figura 1.1</b>	Elementos de la gestión integral de residuos.....	5
<b>Figura 1.2</b>	Jerarquía de la gestión de residuos .....	6
<b>Figura 1.3</b>	Distribución porcentual en peso de RCD en España.....	10
<b>Figura 1.4</b>	Distribución porcentual en peso de RCD en New Hampshire .....	11
<b>Figura 1.5</b>	Esquema de gestión documental .....	28
<b>Figura 1.6</b>	Etapas de gestión de los RCD .....	33
<b>Figura 1.7</b>	Prácticas de minimización de residuos.....	34
<b>Figura 1.8</b>	Esquema de las barreras impermeabilizantes en vertederos de inertes. ....	38
<b>Figura 1.9</b>	Esquema de las capas de cierre en vertederos de inertes.....	39
<b>Figura 1.10</b>	Esquema de un ACV según la norma ISO 14040-44 (2006).....	40
<b>Figura 1.11</b>	Esquema de la etapa de inventario del ciclo de vida. ....	41
<b>Figura 1.12</b>	Elementos de la etapa de evaluación del impacto del ciclo de vida .....	42
<b>Figura 1.13</b>	Relaciones entre los elementos en la etapa de interpretación con las otras etapas del ACV. ....	44
<b>Figura 1.14</b>	Comparación entre los límites del sistema producto y sistema de gestión de residuos. ....	45
<b>Figura 1.15</b>	Esquema del ciclo de vida de un sistema de gestión de residuos vs. sistema producto .....	45
<b>Figura 1.16</b>	Límites de un sistema de gestión de residuos sólidos. ....	47

### CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN AMBIENTAL DE SISTEMAS DE GESTIÓN DE RCD CON TÉCNICAS DE ACV

<b>Figura 4.1</b>	Límites del sistema general para el ACV de la gestión de RCD.....	74
<b>Figura 4.2</b>	Límites del sistema simplificado para el ACV de la gestión de RCD.....	75
<b>Figura 4.3</b>	Metodología para el ACV de cada etapa del SGIRCD .....	77
<b>Figura 4.4</b>	Límites del subsistema en recogida selectiva de RCD.....	80
<b>Figura 4.5</b>	Límites del subsistema en recogida no- selectiva de RCD.....	80
<b>Figura 4.6</b>	Ejemplo de gráfica de EICV de cada contenedor-fracción de RCD en Recogida .....	84
<b>Figura 4.7</b>	Ejemplo de gráfica de EICV en etapa Recogida .....	85
<b>Figura 4.8</b>	Límites del subsistema en la etapa de transporte.....	86
<b>Figura 4.9</b>	Ejemplo de gráfica de EICV en etapa transporte .....	90
<b>Figura 4.10</b>	Esquema básico de funcionamiento de una planta PCRI-1 .....	91
<b>Figura 4.11</b>	Esquema básico de funcionamiento de una planta PCRI-2 .....	92
<b>Figura 4.12</b>	Esquema básico de funcionamiento de una PCRI-3 .....	93
<b>Figura 4.13</b>	Límites del subsistema en la etapa de clasificación y reproceso de inertes ....	95
<b>Figura 4.14</b>	Esquema del flujo de RCD en una PCRI .....	102
<b>Figura 4.15</b>	Ejemplo de gráfica del perfil ambiental de una PCRI.....	102
<b>Figura 4.16</b>	Límites del subsistema en la etapa de Tratamiento: Reciclaje.....	104
<b>Figura 4.17</b>	Procesos incluidos en la obtención de material virgen y reciclado.....	105
<b>Figura 4.18</b>	Procesos alternativos incluidos en la obtención de material reciclado .....	106
<b>Figura 4.19</b>	Impactos del Reciclaje incluida la carga evitada por material virgen.....	107
<b>Figura 4.20</b>	Ejemplo de gráfica de EICV por reciclaje .....	111
<b>Figura 4.21</b>	Ejemplo de gráfica de EICV cada fracción reciclada .....	112

<b>Figura 4.22</b>	Límites del subsistema en etapa de Tratamiento: Recuperación de áreas....	113
<b>Figura 4.23</b>	Ejemplo de gráfica del EICV en etapa RA .....	116
<b>Figura 4.24</b>	Límites del subsistema en la etapa de disposición final: vertido .....	117
<b>Figura 4.25</b>	Ejemplo de gráfica de EICV en etapa VT.....	119
<b>Figura 4.26</b>	Escenarios S1 y S2 de SGIRCD .....	120
<b>Figura 4.27</b>	Escenario S3 de SGIRCD .....	120

## CAPÍTULO 5. CATEGORÍAS DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA APLICADAS A LA GESTIÓN DE RCD

<b>Figura 5.1</b>	Marco general de la EICV .....	124
<b>Figura 5.2</b>	Mecanismo ambiental del proceso de desertificación .....	135
<b>Figura 5.3</b>	Volumen de vertido en relación a los cauces de riego y desagüe.....	142
<b>Figura 5.4</b>	Vertido incontrolado de RCD de tipo superficial.....	143
<b>Figura 5.5</b>	Vertido incontrolado de tipo “en altura” .....	143
<b>Figura 5.6</b>	Localización de sitios de disposición incontrolada de RCD .....	144
<b>Figura 5.7</b>	Ejemplo de resultados gráficos del relevamiento para un sitio .....	146

## CAPÍTULO 6. DISEÑO DE LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA ACV-RCD

<b>Figura 6.1</b>	Premisas generales de la herramienta ACV-RCD .....	152
<b>Figura 6.2</b>	Escenario de Recogida Selectiva .....	157
<b>Figura 6.3</b>	Escenario de Recogida No-Selectiva .....	157
<b>Figura 6.4</b>	Mecánica operativa de la herramienta .....	158
<b>Figura 6.5</b>	Esquema de resultados de ACV-RCD .....	160
<b>Figura 6.6</b>	Contenedores de pre-recogida en obra.....	166
<b>Figura 6.7</b>	Contenedor de recogida selectiva de residuos inertes.....	166
<b>Figura 6.8</b>	Almacenamiento de RCD en saco de rafia .....	167
<b>Figura 6.9</b>	Recogida no-selectiva de RCD .....	167
<b>Figura 6.10</b>	Camión elevador .....	169
<b>Figura 6.11</b>	Camión volquete .....	169
<b>Figura 6.12</b>	Camión remolque.....	169

## CAPÍTULO 7. CASOS DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN AMBIENTAL

<b>Figura 7.1</b>	Límites del sistema de gestión de RCD en España .....	174
<b>Figura 7.2</b>	PCRI-3, Tipo II .....	178
<b>Figura 7.3</b>	Sector de pre-tratamiento con retropinza .....	179
<b>Figura 7.4</b>	Criba parrilla en PCRI-3 .....	180
<b>Figura 7.5</b>	Electroimán .....	180
<b>Figura 7.6</b>	Vista externa de una cabina de separación manual .....	181
<b>Figura 7.7</b>	Vista interna de una cabina de separación manual.....	181
<b>Figura 7.8</b>	Separador hidráulico .....	182
<b>Figura 7.9</b>	Diagrama de flujo y límites del sistema para plantas de nivel 3, Tipo I y Tipo II. ....	183
<b>Figura 7.10</b>	Selección de la fracción metales .....	185
<b>Figura 7.11</b>	Selección de la fracción plásticos en planta.....	185
<b>Figura 7.12</b>	Impactos ambientales del sistema de gestión de RCD, sistema A.....	187
<b>Figura 7.13</b>	Impactos ambientales del sistema de gestión de RCD, sistema B. ....	188

<b>Figura 7.14</b>	Contribución del reciclaje de las distintas fracciones, sistema A .....	188
<b>Figura 7.15</b>	Perfil ambiental de las Plantas Tipo I – RCD Mixto .....	189
<b>Figura 7.16</b>	Perfil ambiental de las Plantas Tipo II- RCD mixto .....	190
<b>Figura 7.17</b>	Contribución al impacto ambiental de los tipos de energía en plantas de RCD mixtos.....	190
<b>Figura 7.18</b>	Comparación del perfil ambiental de plantas Tipo I y Tipo II.....	190
<b>Figura 7.19</b>	Sistema de trituración por quijadas .....	195
<b>Figura 7.20</b>	Equipo de cribado móvil.....	195
<b>Figura 7.21</b>	Planta de reproceso móvil, nivel 1 .....	196
<b>Figura 7.22</b>	Planta de nivel 2 con separación manual en la línea de producción. ....	197
<b>Figura 7.23</b>	Planta de nivel 2, sin separación manual en la línea de producción .....	197
<b>Figura 7.24</b>	Contribución al impacto ambiental de cada etapa en el escenario S1.....	200
<b>Figura 7.25</b>	Contribución al impacto ambiental de cada etapa en el escenario S2.....	201
<b>Figura 7.26</b>	Contribución al impacto ambiental de cada etapa en el escenario S3.....	202
<b>Figura 7.27</b>	Contribución de cada etapa al ADP en los escenarios S1, S2 y S3.....	203
<b>Figura 7.28</b>	Contribución de cada etapa al GWP en los escenarios S1, S2 y S3.....	203
<b>Figura 7.29</b>	Contribución al calentamiento global de los escenarios S1, S2 y S3.....	204
<b>Figura 7.30</b>	Comparación del impacto ambiental de los escenarios S1, S2 y S3.....	204
<b>Figura 7.31</b>	Tipo de viviendas del estudio de caso analizado .....	206
<b>Figura 7.32</b>	EICV de RCD generados en edificación por metro cuadrado de superficie .....	208



## Índice de Tablas

### CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

<b>Tabla 1.1</b>	Composición de RCD según la actividad generadora.....	9
<b>Tabla 1.2</b>	Composición química de los RCD de hormigón .....	11
<b>Tabla 1.3</b>	Composición química de los RCD cerámicos.....	11
<b>Tabla 1.4</b>	Impactos ambientales generados por los RCD.....	12
<b>Tabla 1.5</b>	Legislación europea sobre residuos .....	22
<b>Tabla 1.6</b>	Procedimientos de admisión de residuos en vertederos.....	23
<b>Tabla 1.7</b>	Legislación española sobre residuos sólidos y RCD.....	25
<b>Tabla 1.8</b>	Objetivos cuantitativos marcados por el PNIR (2008-2015) .....	27
<b>Tabla 1.9</b>	Objetivos marcados por el Plan Integral de Residuos de Aragón.....	27
<b>Tabla 1.10</b>	Criterios y procedimientos para la gestión diferenciada de los RCC.....	30
<b>Tabla 1.11</b>	Plazos establecidos por la Res. CONAMA 307/2002.....	30
<b>Tabla 1.12</b>	Normas Técnicas relativas a RCC .....	30
<b>Tabla 1.13</b>	Clasificación de RCD en la normativa del Distrito Federal.....	31
<b>Tabla 1.14</b>	Categoría y requerimientos de los generadores de RCD .....	31
<b>Tabla 1.15</b>	Ejemplos de bases de datos de inventario del ciclo de vida.....	41
<b>Tabla 1.16</b>	Categorías de impacto frecuentemente utilizadas en ACV.....	43
<b>Tabla 1.17</b>	Ejemplos de métodos de evaluación del impacto. ....	43
<b>Tabla 1.18</b>	Características de programas informáticos de evaluación del impacto.....	50
<b>Tabla 1.19</b>	Categorías de impacto en programas informáticos de evaluación .....	50

### CAPÍTULO 3. GENERACIÓN DE RCD. DATOS DE CARACTERIZACIÓN

<b>Tabla 3.1</b>	Categorías y sub- categorías en el flujo de RCD .....	60
<b>Tabla 3.2</b>	Producción de residuos en edificación.....	61
<b>Tabla 3.3</b>	Trabajos publicados en relación a caracterización de RCD a nivel regional ..	62
<b>Tabla 3.4</b>	Población estratificada. ....	66
<b>Tabla 3.5</b>	Media y varianza para el estrato M y variable V1 .....	67
<b>Tabla 3.6</b>	Repartición medias muestrales estratificadas por V1 y V2 .....	68
<b>Tabla 3.7</b>	Repartición desvíos típicos muestrales estratificados por V1 y V2.....	68
<b>Tabla 3.8</b>	Distribución de las estimaciones por estrato.....	68
<b>Tabla 3.9</b>	Superficie construida en el gran Mendoza (2003-2008). ....	71
<b>Tabla 3.10</b>	Cálculo del número de cuotas por estrato.....	71
<b>Tabla 3.11</b>	Cálculo del número de muestras .....	72

### CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN AMBIENTAL DE SISTEMAS DE GESTIÓN DE RCD CON TÉCNICAS DE ACV

<b>Tabla 4.1</b>	Categorías de impacto probables para el estudio de ACV de un SGIRCD.....	76
<b>Tabla 4.2</b>	Fraciones del flujo de RCD.....	78
<b>Tabla 4.3</b>	Modelo de planilla para datos de contenedores .....	81
<b>Tabla 4.4</b>	Modelo de planilla para estimar la cantidad de contenedores de cada fracción de RCD .....	82
<b>Tabla 4.5</b>	Modelo de planilla para el inventario de ciclo de vida de contenedores.....	82
<b>Tabla 4.6</b>	Modelo de planilla para los indicadores de impacto para contenedores .....	82
<b>Tabla 4.7</b>	Modelo de planilla para indicadores de impacto en Recogida (selectiva) .....	84

<b>Tabla 4.8</b>	Valores límites de carga según la legislación argentina y española.....	87
<b>Tabla 4.9</b>	Modelo de planilla del consumo de combustible según la potencia del vehículo.....	87
<b>Tabla 4.10</b>	Modelo de planilla del cálculo del consumo medio de combustible.....	87
<b>Tabla 4.11</b>	Modelo de planilla del consumo de combustible en Transporte.....	88
<b>Tabla 4.12</b>	Modelo de planilla del inventario de ciclo de vida para 1 kg de diesel .....	88
<b>Tabla 4.13</b>	Modelo de planilla de indicadores de impacto para combustible diesel .....	88
<b>Tabla 4.14</b>	Modelo de planilla de indicadores de impacto en etapa Transporte .....	89
<b>Tabla 4.15</b>	Planilla de datos a relevar en PCRI.....	96
<b>Tabla 4.16</b>	Modelo de planilla de datos de consumo del inventario de PCRI .....	97
<b>Tabla 4.17</b>	Modelo de planilla para datos de entrada de energía y materiales en PCRI-3 .....	97
<b>Tabla 4.18</b>	Modelo de planilla de datos de composición del mix eléctrico .....	98
<b>Tabla 4.19</b>	Modelo de planilla de datos de inventario del mix eléctrico .....	98
<b>Tabla 4.20</b>	Modelo de planilla de indicadores de impacto para el mix eléctrico .....	99
<b>Tabla 4.21</b>	Modelo de planilla de indicadores de impacto para las PCRI .....	101
<b>Tabla 4.22</b>	Modelo de planilla de eficiencia para cada fracción residual .....	104
<b>Tabla 4.23</b>	Productos evitados y reproceso de la fracción inerte .....	107
<b>Tabla 4.24</b>	Productos evitados y reproceso del plástico residual.....	108
<b>Tabla 4.25</b>	Productos evitados y reproceso del vidrio residual.....	108
<b>Tabla 4.26</b>	Productos evitados y reproceso de la madera residual.....	109
<b>Tabla 4.27</b>	Productos evitados y reproceso del cartón residual. ....	109
<b>Tabla 4.28</b>	Producto evitado y reproceso del metal residual.....	109
<b>Tabla 4.29</b>	Fracciones residuales, productos evitados y proporción de sustitución.....	110
<b>Tabla 4.30</b>	Modelo de planilla de datos de ICV del reproceso .....	110
<b>Tabla 4.31</b>	Modelo de planilla de indicadores del reciclaje de cada fracción residual y total .....	111
<b>Tabla 4.32</b>	RCD admisibles en vertederos de inertes .....	114
<b>Tabla 4.33</b>	Datos de consumo para Recuperación de áreas .....	114
<b>Tabla 4.34</b>	Datos de inventario por impacto de uso del suelo .....	115
<b>Tabla 4.35</b>	Modelo de planilla de indicadores de impacto para la etapa RA.....	116
<b>Tabla 4.36</b>	Indica una lista de RCD y su requerimiento de vertedero .....	117
<b>Tabla 4.37</b>	Lixiviado generado por residuos no biodegradables.....	118
<b>Tabla 4.38</b>	Modelo de planilla de indicadores de impacto para la etapa VT .....	119

## CAPÍTULO 5. CATEGORÍAS DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA APLICADAS A LA GESTIÓN DE RCD

<b>Tabla 5.1</b>	Categorías y métodos utilizados en EICV de gestión de RCD .....	130
<b>Tabla 5.2</b>	Categorías de impacto incluidas en ACV según antecedentes.....	132
<b>Tabla 5.3</b>	Categorías de impacto seleccionadas para el ACV de la gestión de RCD....	133
<b>Tabla 5.4</b>	Modelo de planilla para datos del ICV del indicador desertificación en SGIRCD .....	137
<b>Tabla 5.5</b>	Datos de localización de los sitios seleccionados .....	145
<b>Tabla 5.6</b>	Índice de aridez de la localidad.....	145
<b>Tabla 5.7</b>	Factor de cobertura vegetal de cada actividad .....	146
<b>Tabla 5.8</b>	Área y volumen de la actividad en cada caso .....	147

<b>Tabla 5.9</b>	Intervalo de confianza para la media del área y volumen de los depósitos de RCD .....	147
<b>Tabla 5.10</b>	Datos del ICV de cada caso de vertido incontrolado analizado.....	148
<b>Tabla 5.11</b>	Cálculo del Indicador de desertificación de la actividad .....	148

## CAPÍTULO 6. DISEÑO DE LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA ACV-RCD

<b>Tabla 6.1</b>	Fracciones de RCD incluidas en ACV-RCD .....	153
<b>Tabla 6.2</b>	Relación Tipo de contenedor- Fracción RCD en etapa Recogida.....	154
<b>Tabla 6.3</b>	Relación Volumen de carga- Fracción RCD en Transporte.....	155
<b>Tabla 6.4</b>	Instalaciones de gestión incluidas en ACV-RCD .....	157
<b>Tabla 6.5</b>	Indicadores de impacto unitarios para cada elemento de entrada .....	159
<b>Tabla 6.6</b>	Indicadores de categoría de impacto en ACV-RCD.....	160
<b>Tabla 6.7</b>	Unidades de los datos en el cálculo de la cantidad de RCD total .....	162
<b>Tabla 6.8</b>	Datos de composición por defecto en ACV-RCD.....	164
<b>Tabla 6.9</b>	Datos de eficiencia de clasificación y reproceso por defecto.....	164
<b>Tabla 6.10</b>	Participación de fuentes energéticas utilizadas en generación eléctrica.....	165
<b>Tabla 6.11</b>	Indicadores ambientales por tipo de contenedor .....	165
<b>Tabla 6.12</b>	Indicadores ambientales del diesel* y energía eléctrica**.....	165
<b>Tabla 6.13</b>	Indicadores ambientales del reproceso de cada fracción recuperada .....	166
<b>Tabla 6.14</b>	Datos de contenedores de RCD y número se usos .....	168
<b>Tabla 6.15</b>	Cálculo de la cantidad de contenedores para cada fracción de RCD .....	168
<b>Tabla 6.16</b>	Consumo de combustible durante el transporte de RCD, según la carga.....	170
<b>Tabla 6.17</b>	Consumo medio de combustible del transporte según la fracción de RCD .	170

## CAPÍTULO 7. CASOS DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN AMBIENTAL

<b>Tabla 7.1</b>	Ítems consultados en empresas PCRI españolas para obtener la composición de RCD .....	175
<b>Tabla 7.2</b>	Composición de RCD en PCRI españolas .....	176
<b>Tabla 7.3</b>	Mix eléctrico en España (REE, 2010).....	176
<b>Tabla 7.4</b>	Indicadores ambientales del diesel y energía eléctrica para el caso español	177
<b>Tabla 7.5</b>	Contenedores utilizados en el sistema español .....	177
<b>Tabla 7.6</b>	Indicadores de categoría de impacto para contenedores del sistema español .....	177
<b>Tabla 7.7</b>	Distancias por itinerario para el caso de estudio español.....	178
<b>Tabla 7.8</b>	Entrada de energía y materiales en la etapa de clasificación y reproceso de inertes .....	184
<b>Tabla 7.9</b>	Asignación de los consumos para plantas Tipo I y Tipo II.....	184
<b>Tabla 7.10</b>	Materiales obtenidos en la PCRI y productos evitados.....	185
<b>Tabla 7.11</b>	Valores de eficiencia de reproceso adoptados para el sistema español.....	186
<b>Tabla 7.12</b>	Indicadores ambientales del reproceso de cada fracción incluida la carga evitada.....	186
<b>Tabla 7.13</b>	Etapas, impactos y carga evitada incluidos en el sistema de gestión de RCD .....	187
<b>Tabla 7.14</b>	Contribución porcentual de procesos al impacto ambiental. Planta Tipo I-RCD mixto .....	189

<b>Tabla 7.15</b>	Contribución porcentual de procesos al impacto ambiental. Planta Tipo II-RCD Mixto.....	189
<b>Tabla 7.16</b>	Comparativa porcentual de los impactos ambientales de las PCRI Tipo I y II.....	191
<b>Tabla 7.17</b>	Contenedores utilizados en Las Heras, Mendoza. ....	193
<b>Tabla 7.18</b>	Distancias por itinerario para el caso de estudio Las Heras.....	194
<b>Tabla 7.19</b>	Datos de inventario para PCRI-1. Caso México.....	196
<b>Tabla 7.20</b>	Datos de inventario para cálculo del indicador DP en PCRI-1 .....	198
<b>Tabla 7.21</b>	Datos de eficiencia a aplicar por defecto en ACV-RCD.....	198
<b>Tabla 7.22</b>	Productos evitados y reproceso de la fracción inerte en Mendoza .....	198
<b>Tabla 7.23</b>	Datos de ICV para el reproceso de inertes incluido la carga evitada en Mendoza.....	199
<b>Tabla 7.24</b>	Inventario para el cálculo del indicador DP en vertedero .....	199
<b>Tabla 7.25</b>	EICV del escenario S1, situación actual en Las Heras para 1 t RCD .....	200
<b>Tabla 7.26</b>	Indicador de desertificación para el Escenario S1, etapa vertido incontrolado .....	200
<b>Tabla 7.27</b>	EICV del escenario S2 en Las Heras .....	201
<b>Tabla 7.28</b>	EICV del escenario S3, en Las Heras (para 1 t RCD) .....	202
<b>Tabla 7.29</b>	Indicador de desertificación para el Escenario S3 .....	202
<b>Tabla 7.30</b>	Resultados totales de la EICV para cada escenario .....	202
<b>Tabla 7.31</b>	Indicadores de Desertificación para los escenarios S1, S2 y S3 .....	204
<b>Tabla 7.32</b>	Generación de RCD en viviendas .....	206
<b>Tabla 7.33</b>	Resultados de la EICV por categoría de impacto. Caso viviendas .....	207

## CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS

<b>Tabla 8.1</b>	Categorías de impacto seleccionadas para el ACV de la gestión de RCD..	214
------------------	--	-----

## **Lista de Abreviaturas**

ACV: Análisis de Ciclo de Vida

ICV: Inventario de Ciclo de Vida

EICV: Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida

Ec: Ecuación

ADP: Indicador de Disminución de Recurso Abiótico

AP: Indicador de Acidificación

EP: Indicador de Eutrofización

GWP: Indicador de Calentamiento Global

PCOP: Indicador de Formación de foto- oxidantes

RCD: Residuos de Construcción y Demolición

ISO: Organización Internacional de Estandarización

SGIRCD: Sistema de Gestión Integral de Residuos de Construcción y Demolición

PCRI: Plantas de Clasificación y Reproceso de Inertes

DP: Indicador de Desertificación

# Capítulo 1. MARCO TEÓRICO

---

## **Resumen**

En este Capítulo se introduce el concepto de sostenibilidad aplicado a la gestión de residuos en general y el enfoque integral de dicha gestión. Se desarrolla el marco teórico referido a la gestión de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) y su marco legal. Se definen los conceptos básicos vinculados a la metodología de evaluación ambiental de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) y su aplicación a la gestión de residuos sólidos.

### **1.1. Los residuos sólidos: la gestión sostenible**

Hasta épocas recientes no ha habido una conciencia clara sobre el problema que se genera en el proceso de transformación de las materias primas en un producto de consumo y la consiguiente etapa final de transformación de producto en residuo, una vez finalizada su vida útil. Desde este enfoque, los residuos pueden considerarse como subproductos “sin valor” de la actividad humana. Físicamente contienen los mismos materiales del producto del cual provienen, y en muchos casos la desvalorización está relacionada a la composición mixta y desconocida de los residuos.

El concepto de residuo se refiere a toda sustancia u objeto generado por una actividad humana productiva o de consumo, que no resulta útil para su poseedor y por la cual tenga la intención, o bien la obligación de desprenderse (Elías Ed., 2009a).

Los residuos pueden clasificarse según varios criterios, entre los cuales tal vez el más global sea, por su estado físico en sólidos, líquidos y gaseosos. Los residuos sólidos, objeto de estudio en esta tesis, a su vez se pueden clasificar en función del tipo de material que lo constituyen, sus propiedades físicas, la actividad que los originan y su peligrosidad, entre otros criterios.

Las preocupaciones relacionadas con los residuos han estado, y siguen estando principalmente, en torno a los temas de salud y seguridad humana. Los gobiernos locales se han responsabilizado históricamente del tratamiento de los residuos sólidos utilizando para ello el enterramiento, con lo cual los residuos se dejan allí en fase sólida para las generaciones venideras (Colomer y Szantó, 2011).

La conservación de los recursos ha sido otra de las preocupaciones ambientales que ha llevado a accionar respecto al manejo de residuos. En 1972 se publicó el libro “Los límites del

Crecimiento” (Meadows *et al.*, 1972), donde se aseguraba que las tasas de utilización de los recursos naturales y energía no renovables no podían continuar de manera indefinida. En 1992, en “Mas allá de los límites” (Meadows *et al.*, 1992) los autores insistieron sobre este concepto pero con la urgencia de que las materias primas estaban siendo utilizadas a una velocidad mayor a la de reemplazo, o a la de búsqueda de alternativas. Estos conceptos, sin embargo, tuvieron mucha discusión puesto que las “reservas demostradas de materia prima” han sido mayores en épocas posteriores a la publicación de esos informes. Esto se debe a que las “reservas demostradas” se definen como reservas que pueden ser extraídas con la tecnología y estructura actuales. Por lo tanto, las innovaciones tecnológicas permiten que aumente la disponibilidad de recursos inclusive a un costo asociado menor (McDougall *et al.*, 2004). Por otra parte, el consumo ha cambiado a favor de productos y servicios que involucran menos materiales y que introducen materiales reciclados. Todo esto se traduce en una disminución en el uso de materiales y una estabilización en el uso per cápita de materiales básicos (madera y metales) en muchos países. Cabe señalar, que de ningún modo estos argumentos niegan que los recursos sean agotables, pero sí confirman que en muchos casos el tiempo que se requiere para que esto suceda es largo, lo cual permite la implementación de desarrollo tecnológico. Con todo ello, esta preocupación real de conservar los recursos, ha tenido dos consecuencias importantes relativas al manejo de residuos: en primer lugar su minimización, es decir, reducción en la cantidad que se genera, y en segundo término, la recuperación de los mismos, ya sea material o energética.

Otra de las preocupaciones ambientales relacionadas con la gestión de los residuos es la ocasionada por la contaminación que generan en el ambiente. Un modo particular de estas inquietudes ha sido la que específicamente ocurre a nivel local cada vez que se propone abrir nuevas instalaciones para el tratamiento de los residuos. Estas han dado lugar a diversas actitudes de la sociedad que enfrentan los responsables de la planeación del manejo de residuos. Estas actitudes comunes pueden sintetizarse como sigue:

- “NO” cerca de donde vivo (NIMBY: Not In My Back Yard)
- “NO” en mi periodo de gobierno (NIMET: Not In My Elected Term)
- “No” se construya absolutamente nunca nada cerca de nadie (BANANA: Build Absolutely Nothing Anytime, Near Anybody)
- La tecnología más barata disponible al borde de la ilegalidad (CATNAP: Cheapest Available Technology Narrowly Avoiding Prosecution)

A través de los años, el desarrollo de la sociedad y la industria, junto con la creciente toma de conciencia de los problemas medioambientales, ha llevado a la aplicación de métodos tecnológicos cada vez más sofisticados y seguros para el manejo de residuos.

Entre los años 1970 y 1990 se concretan tecnologías de eliminación con discusiones muchas veces irracionales y en términos extremos acerca de su conveniencia sin ninguna referencia al contexto específico. Por ejemplo, quienes estaban a favor de la incineración eran contrarios a los vertederos y la recuperación, mientras que las personas que apoyaban el vertido difamaban los otros métodos, y así sucesivamente.

Desde el punto de vista ambiental, la gestión actual de residuos sólidos debe cumplir numerosos requisitos que se derivan de una mayor conciencia y percepción de los problemas ambientales por parte del público, y de los avances científicos centrados en dar solución a problemas como limitación de recursos, cambio climático, contaminación generalizada, crecimiento demográfico, agotamiento de las fuentes de energía no renovables, etc. Así, desde

este planteamiento, la gestión de residuos debe incorporar los siguientes requerimientos (Cossu, 2009):

- disminución de la producción de residuos
- garantía de un servicio eficiente de recolección y disposición
- optimización de la recuperación de materiales
- énfasis en el cambio climático y la minimización de los gases efecto invernadero
- reducción de los volúmenes de residuos destinados a los vertederos
- optimización del balance de energía con el uso de energía procedente de residuos
- reducción de las emisiones, monitoreo de efectos toxicológicos y minimización de riesgos para la salud

Obligatoriamente, estos requisitos de carácter ambiental deben ser integrados y evaluados en los diversos ámbitos geográficos en los que una serie de situaciones económicas, sociales y técnicas pueden influir en la elección de las opciones de gestión más favorable, y elegir la combinación de tecnologías más apropiadas suele ser la mayor dificultad (Gallardo *et al.*, 2011).

La sostenibilidad o Desarrollo Sostenible ha sido definida por la Comisión Mundial para el Medio Ambiente y el Desarrollo de la Organización de las Naciones Unidas en 1987, en su “Informe Brundtland” como “el desarrollo que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” (WCED, 1987). Esta definición identifica la sinergia entre el desarrollo económico, la igualdad social y el ambiente. Por lo tanto, aplicado este concepto a los residuos, su manejo debe ser factible económicamente, aceptable socialmente y efectivo en términos ambientales (McDougall *et al.*, 2004 op. cit.).

La eficiencia ambiental implica que el sistema de gestión de residuos debe reducir, tanto como sea posible, las cargas ambientales asociadas con su manejo. La factibilidad económica exige que dicho sistema opere a un costo aceptable para la comunidad, incluyendo todos los ciudadanos, negocios y organizaciones gubernamentales. Finalmente, la aceptabilidad social requiere que el sistema funcione de manera admisible para la mayoría de las personas de una comunidad, para lo cual es necesario implementar planes de información y educación a fin de desarrollar la confianza y el apoyo de los sectores implicados.

El factor económico ha sido, en el pasado, el principal factor de control involucrado en el proceso de tomas de decisiones, mientras que actualmente las consideraciones ambientales desempeñan un papel más importante. En cuanto a la inclusión de los aspectos sociales en el manejo de residuos, cabe señalar que se ha dado de manera limitada debido a que las investigaciones sobre cómo medir las preocupaciones sociales aun tienen pocos resultados aplicables.

### **1.1.1. Concepto de gestión integral de residuos sólidos**

De lo analizado en el apartado 1.1 se desprenden dos estrategias fundamentales en el manejo de residuos: la reducción en su generación y su gestión sostenible. Ambas apuntan a abordar tanto aspectos de contaminación como de conservación de recursos, junto con sus implicaciones económicas y sociales.

El enfoque de sistema para el manejo de residuos, fue propuesto por W.R. Lynn en 1962, y descrito como “...la concepción del problema en su totalidad como un sistema interconectado de componentes, operaciones y funciones...” (McDougall, *et al.*, 2004 op. cit.). A partir de aquí

se aceptó la necesidad de modelos matemáticos a fin de optimizar las operaciones de manejo de residuos.

Posteriormente en 1978, R. M. Clark observó que "...los métodos, el equipo, y las prácticas de manejo de residuos no debieran ser las mismas para todo el país, dado que las condiciones varían...". Luego en 1991, un grupo de trabajo de la Comisión Económica Europea publicó un Borrador de Estrategia Regional para la Gestión Integral de Residuos (GIR) que definió GIR como "...un proceso de cambio en el cual el concepto de manejo de residuos se amplía gradualmente y llega a incluir el control necesario de los flujos de materiales gaseosos, líquidos y sólidos en el ambiente humano" (McDougall, *et al.*, 2004 op. cit.).

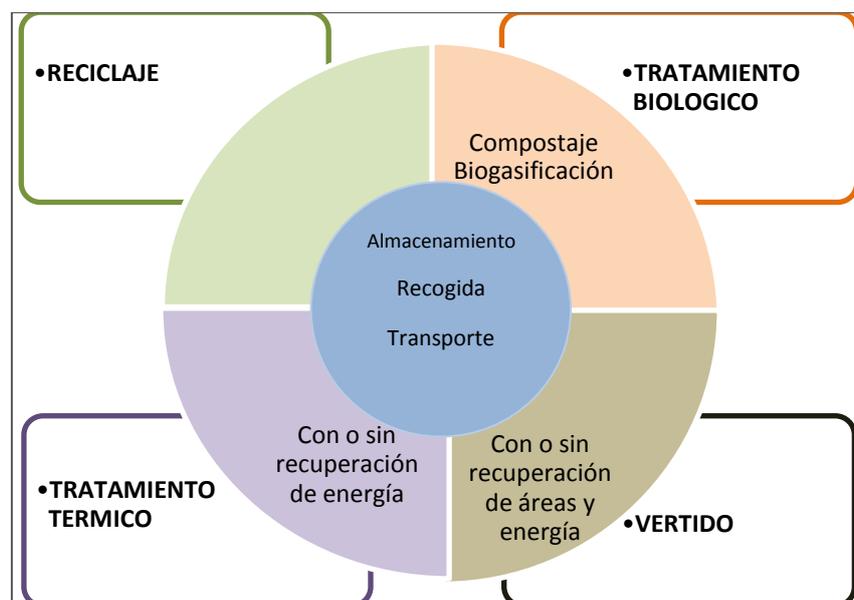
Luego Kreith y Tchobanoglous (2002) han definido un sistema de gestión integrado de residuos como "...la selección y aplicación de técnicas, tecnología y programas de manejo adecuado para lograr las metas y objetivos específicos de la gestión de residuos".

Un Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos (SGIRS) se define como aquel que combina los flujos de generación de residuos con los métodos de recolección, tratamiento y disposición, a fin de alcanzar beneficios ambientales, optimización económica y aceptación por la sociedad (McDougall, *et al.*, 2004 op. cit.). Así, un SGIRS constituye una estrategia que se aproxima a la sostenibilidad en la gestión de los residuos. Las características clave de los SGIRS son, además, un enfoque global en su diseño, el uso de una serie de métodos alternativos de recolección y tratamiento y el manejo de todos los materiales contenidos en el flujo de residuos.

En general, cualquiera sea el origen de los residuos un SGIRS debe incluir un esquema optimizado de recolección de residuos y una separación y clasificación eficientes, seguidos de algunas de las siguientes alternativas de tratamiento: reciclaje de materiales, tratamiento biológico de materiales orgánicos, tratamiento térmico, y la disposición final. La consideración de todas las fracciones de residuos requerirá una o varias de las opciones de tratamiento, siendo la disposición final la única actividad que puede involucrar a todos los tipos de residuos, pero a costa de requerir grandes espacios de terrenos y generar riesgos ambientales asociados a la generación de gases, lixiviados y vectores (en este contexto se entiende como vector a un portador o huésped intermedio de un parásito o virus que transmite el germen de una enfermedad a otro huésped) por causa de los residuos. Por este motivo, el uso de otras opciones de tratamiento previas tiene un doble objetivo: desviar porciones significativas del flujo de residuos aprovechables y reducir los requerimientos de espacio y las cargas ambientales de la disposición final. La Figura 1.1 esquematiza los elementos de un sistema de gestión integral aplicado a residuos sólidos en general.

El éxito de la implementación de un SGIRS dependerá de que cuente con varias características que mencionamos a continuación, indispensables para que sea sostenible en el tiempo (McDougall *et al.*, 2004 op. cit.):

- Orientación de mercado: se refiere a que la aplicación de tecnologías de valorización, tales como reciclaje, compostaje o recuperación de energía, dependen de los mercados disponibles para los productos o energía obtenidos. Dichos mercados son sensibles a los precios y a la cantidad y calidad de los productos generados.
- Flexibilidad: implica que el sistema pueda adaptarse a los cambios regionales a lo largo del tiempo y a las variaciones por región. Al usar un rango de opciones de manejo, por ejemplo, una misma fracción puede ser tratada de diferentes formas según la conveniencia económica o ambiental del momento.



**Figura 1.1.**Elementos de la gestión integral de residuos

- Escala: este concepto significa que es conveniente que los SGIRS se organicen a gran escala. Diversas experiencias han demostrado el beneficio de las economías de escala en la gestión de residuos, tanto en los sistemas de recolección como en los de tratamiento. Así, por ejemplo, para residuos sólidos urbanos se estima necesaria un área con más de 500.000 viviendas. Los esquemas en escalas pequeñas son viables pero requieren la implementación de tecnologías menos sofisticadas.
- Aceptación social: esta característica conlleva fundamentalmente a la participación pública en los SGIRS. Esta puede darse al momento de la planificación por medio de consultas e información, la educación formal y no-formal, y durante su implementación, donde los individuos deben entender cuál es el papel que desempeñan en el sistema y cómo cooperar con las autoridades locales. Esta participación determinará las tasas de reciclaje conseguidas o la aceptación de la ubicación de instalaciones de tratamiento, por ejemplo. Por otra parte, se necesita mantener la credibilidad e integridad del sistema ante el público, por ejemplo, que éste tenga la certeza de que cualquier material separado y clasificado recibe la gestión adecuada.

A pesar de lo dicho hasta ahora, puede ponerse en duda la importancia de considerar el sistema de residuos en su conjunto, debido a que el manejo de residuos involucra a diferentes agentes públicos o privados. Así, la recolección suele ser responsabilidad de las autoridades locales, pero frecuentemente se concesiona; las instalaciones de disposición final suelen estar en manos de otra empresa, generalmente privada, varios operadores pueden contribuir a operaciones de reciclaje u otros tratamientos, etc. Cada empresa o entidad gubernamental controla solamente el manejo de residuos en su ámbito. Sin embargo, un SGIRS tiene un enfoque holístico, que permite obtener las siguientes ventajas:

- Proporciona el panorama global del proceso de gestión de residuos, el cual resulta esencial para una planeación estratégica.

- Desde el punto de vista ambiental, considera la carga ambiental total del sistema desde una perspectiva racional, puesto que de otro modo las reducciones en una parte del proceso podrían acarrear mayores cargas en otra.
- En términos económicos, analiza el sistema de forma compacta, haciendo posible determinar si opera de manera eficiente, y si podría operarse sin pérdidas e inclusive con ganancias. De otro modo, dentro de los límites que controla cada operador, los ingresos debieran igualar a los costos, como mínimo.
- En un sistema en funcionamiento, los diferentes componentes del sistema están interconectados entre sí de manera que ante un cambio, se rediseña conceptualmente el sistema en su conjunto en vez de realizar constantemente cambios menores en el sistema original.

### 1.1.2. La jerarquía de residuos y el enfoque integral

Una forma de planificar estrategias de gestión de residuos, anterior al enfoque integral, lo constituye la implementación de la “jerarquía de residuos”. La misma establece en general un orden de prioridad de lo que constituye la mejor opción global para el medio ambiente en la legislación y la política en materia de residuos. La jerarquía de opciones de manejo de residuos, en orden descendente de preferencia, se define según la Directiva 2008/98/EC (2008), y se ilustra en la Figura 1.2.



**Figura 1.2.** Jerarquía de la gestión de residuos

Las limitaciones de esta jerarquía se centran en torno a la rigidez de la lista de opciones propuesta. No siempre puede justificarse técnica o científicamente tal prioridad. Su utilidad es mínima cuando se combinan una serie de alternativas de manejo como el caso de los GIRS. Por otra parte, no aborda temas de costos, y por tanto no permite la evaluación óptima desde el punto de vista económico. Finalmente, cabe señalar que no puede adaptarse a las necesidades locales donde el sistema de residuos debe operar efectivamente. Por estos motivos, diferentes organizaciones han propuesto el enfoque holístico para afrontar la gestión de residuos, tales como el Programa Ambiental de las Naciones Unidas (UNEP, 1996) y la Comunidad Económica Europea (COM 666, 2005). Esta última reconoce que puede resultar necesario apartarse de la jerarquía para determinados flujos de residuos cuando esté justificado por un enfoque de ciclo de vida sobre los impactos globales de la generación y gestión de los mismos. Este último concepto significa que la evaluación ambiental se realice sobre todas las etapas de

gestión en su conjunto, ya que medidas adoptadas sobre alguna de ellas pueden perjudicar el perfil ambiental de otras que le anteceden o suceden.

## **1.2. Residuos de construcción y demolición: RCD**

La industria de la construcción denota un papel muy importante en la economía de una región o país, y de su desarrollo dependen en gran medida actividades productivas primarias y de servicios. Es una actividad que consume ingentes cantidades de materia prima y energía, y a la vez genera grandes volúmenes de residuos predominantemente de tipo sólido, los residuos de construcción y demolición (RCD).

Como se expresó en el apartado 1.1 los residuos pueden clasificarse según varios criterios, y los residuos sólidos a su vez, según la actividad que los origina. Uno de los flujos de residuos urbanos de mayor importancia y que han merecido especial atención en los últimos años por parte de las administraciones públicas, son los que provienen de la industria de la construcción civil, que son objeto de estudio en esta tesis.

Los materiales utilizados en la construcción de obras civiles están sometidos a diversas transformaciones durante su ciclo de vida, entendiéndose como tal, la totalidad de etapas desde la explotación de recursos naturales para su fabricación, hasta su disposición final como residuo. El manejo que de ellos se hace durante la última fase, llamada también “fin de vida”, puede presentar distintas características y alternativas dependiendo de factores económicos, técnicos y ambientales.

La definición de RCD ha sido propuesta por distintas legislaciones, siendo común que se incluya en esta categoría a cualquier sustancia u objeto que se genere en una obra de construcción o demolición de la cual su poseedor quiera o tenga la obligación de desprenderse. Sin embargo, y sin hacer una discusión sobre la definición, se adopta en este trabajo, una más completa elaborada en función de lo aportado por el Real Decreto 105/2008 (MPR, 2008). En concordancia con esa normativa, se define a los RCD como aquellos residuos que se generan durante la construcción, renovación (ampliación o reparación) y demolición de obras, sean estas edificios residenciales o no residenciales (industriales, comerciales e institucionales), obras viales (puentes, calles, avenidas), obras hidráulicas (canales de riego, diques) así como cualquier otra obra de ingeniería civil. Incluyen además los generados en instalaciones auxiliares que den servicio exclusivo a la obra, tales como plantas de hormigón elaborado, plantas de concreto asfáltico y depósito de materiales de construcción, en la medida en que el montaje y desmontaje de dichas instalaciones tenga lugar al inicio, o durante la ejecución de la obra.

Los RCD se caracterizan por presentar bajo riesgo ambiental en cuanto a toxicidad; por el contrario, su impacto visual es de importancia mayor por el gran volumen que ocupan y por el escaso control ambiental ejercido sobre los terrenos que se eligen para su depósito (Duran, 2006). Por otra parte, se evidencia un impacto ambiental negativo derivado del desperdicio de materias primas que implica la gestión sin valorización que a menudo se realiza.

El tratamiento y la gestión de los RCD ha evolucionado en las últimas tres décadas hacia un manejo más eficaz y respetuoso con el ambiente. Hasta finales de la década del setenta, solo se practicaba la disposición clandestina e incontrolada. Esta situación ha generado diversos problemas ambientales que aun sigue sin resolverse en muchos países, según su nivel de desarrollo. Por el contrario, en otros países más avanzados, en la actualidad se considera al RCD (y otros tipos de residuos) como un recurso valorizable, y se propician acciones de minimización, reutilización, reciclaje y recuperación energética.

### 1.2.1. Clasificación de RCD

La clasificación de los RCD puede plantearse según distintos factores, tales como la fuente de generación (origen) y la naturaleza del residuo (Mercante *et al.*, 2011). Si se tiene en cuenta el primero de ellos, se obtienen los siguientes tipos:

- Residuos resultantes de limpieza de terrenos, tales como tocones, ramas, árboles. Esta fracción suele estar fuera de los datos de composición de los RCD debido a que su gestión queda fuera del flujo de los RCD.
- Material de excavación, tales como tierras y rocas. Normalmente es un residuo inerte, y en general se incluye en esta clasificación a los excedentes de materiales granulares. En algunos casos se presenta con contaminantes, según el uso que haya tenido el terreno con anterioridad a la construcción de la obra civil, y entonces son considerados residuos. Si no tiene contaminantes se lo excluye de la clasificación de residuo. Desde el punto de vista normativo, en general, queda excluido de la definición de RCD.
- Residuos resultantes de construcción nueva o de renovación (ampliación o reparación) de edificaciones: son los que se originan en el proceso de ejecución material de los trabajos de construcción. Se generan durante la propia acción de construir y de los embalajes de los materiales. Sus características y cantidad son variadas y dependen de la fase del trabajo y del tipo de obra.
- Residuos de demolición de edificaciones: son los que resultan del derribo, las operaciones de desmontaje y el desmantelamiento de edificaciones y sus instalaciones. Se incluyen aquí los residuos parciales originados por los trabajos de reparación. Se obtienen gran cantidad de residuos pétreos, mampostería, hormigón, entre otros.
- Residuos de obras viales e hidráulicas, tales como trozos de losas de hormigón de la demolición y construcción de caminos, residuos de asfalto y mezclas del pavimento asfáltico, residuos de renovación de puentes, entre otros.
- Residuos de desastres: son aquellos generados por la acción de desastres naturales, entre ellos sismo, aluvión, vientos e inundaciones. Particularmente estos residuos no están incluidos en los planes de gestión de RCD por su baja probabilidad de generarse.

Otra clasificación muy útil es la que determina los tipos de RCD de acuerdo a su naturaleza y asociada a las condiciones para el vertido. En este caso se pueden clasificar en tres categorías (CE, 1999):

- Inertes: son residuos no-peligrosos que no experimentan transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas; no son solubles ni combustibles, no reaccionan física ni químicamente ni de ninguna otra manera, no son biodegradables, no afectan negativamente a otras materias con las cuales entran en contacto de forma que puedan dar lugar a contaminación del medio ambiente o perjudicar a la salud humana. La lixiviabilidad total, el contenido de contaminantes de los residuos y la ecotoxicidad del lixiviado deberán ser insignificantes, y en particular no deberán suponer un riesgo para la calidad de las aguas superficiales y/o subterráneas. Esta categoría engloba tierras y rocas de excavación, pétreos, cerámicos y vidrio. Son reciclables.
- No especiales o reciclables: estos residuos tienen la característica de no-peligrosos, y deben ser almacenados o tratados en las mismas condiciones que los residuos

domiciliarios. La mayoría de estos materiales poseen altas posibilidades de reciclaje, actividad que se lleva a cabo en instalaciones industriales juntamente con otras fracciones provenientes de distintas corrientes de residuos, tales como domiciliarios o industriales. En esta clase se incluyen maderas, papel, plásticos, metales y yeso, como fracciones principales.

- Especiales o peligrosos: son los RCD que tienen características que los hacen potencialmente peligrosos, tales como sustancias inflamables, tóxicas, corrosivas, irritantes, cancerígenas. Incluye pinturas, solventes, amianto, aditivos de hormigón, entre otros.

### 1.2.2. Caracterización de RCD

La planificación de la gestión de los RCD, así como la de cualquier tipo de residuos sólidos, requiere de una estimación de datos de generación que se refieren a cantidad, composición y propiedades físico- químicas de los residuos. El conjunto de valores obtenidos constituyen la caracterización de los mismos, y su calidad y fiabilidad es fundamental para apoyar una política de gestión.

La composición, cantidad y propiedades físico-químicas de los RCD dependen de distintas variables (Mercante *et al.*, 2010), tales como: el tipo de estructura (edificio residencial, industrial o comercial; obras viales; obras hidráulicas); el tamaño de la estructura (edificaciones en altura o de una planta); la ubicación geográfica (rural o urbana, región, país); la demografía histórica y el crecimiento actual de la región; el tipo de actividad generadora (construcción, renovación o demolición) (Mália *et al.*, 2013); las prácticas de demolición (selectiva o masiva); el tipo de construcción (tradicional de fábrica o prefabricada) como ha demostrado Jaillon *et al.*, (2008) en Hong Kong. En la Tabla 1.1 se señala la variabilidad de la composición de RCD según el tipo de obra y actividad generadora, en porcentajes calculados en peso de RCD.

**Tabla 1.1** Composición de RCD según la actividad generadora

	Construcción Nueva			Renovación	Demolición	
	Residencial % (1)	Residencial % (2)	Residencial % (3)	Residencial % (4)	Residencial % (5)	Multifamiliar % (6)
Madera	42	67	2	45	42	14
Hormigón	--	5	--	--	24	--
Ladrillos	6	--	34	--	--	14
Tejados	6	--	--	28	--	3
Plásticos	2	--	1	--	--	--
Metales	2	--	--	--	2	--
Yeso (panel)	27	20	5	21	--	17
Mezclas	15	8	55	6	32	1
Escombros (demolición)	--	--	3	--	--	51

(1), (2), (4), (5), (6): US EPA (1998); (3) Mercante (2005)

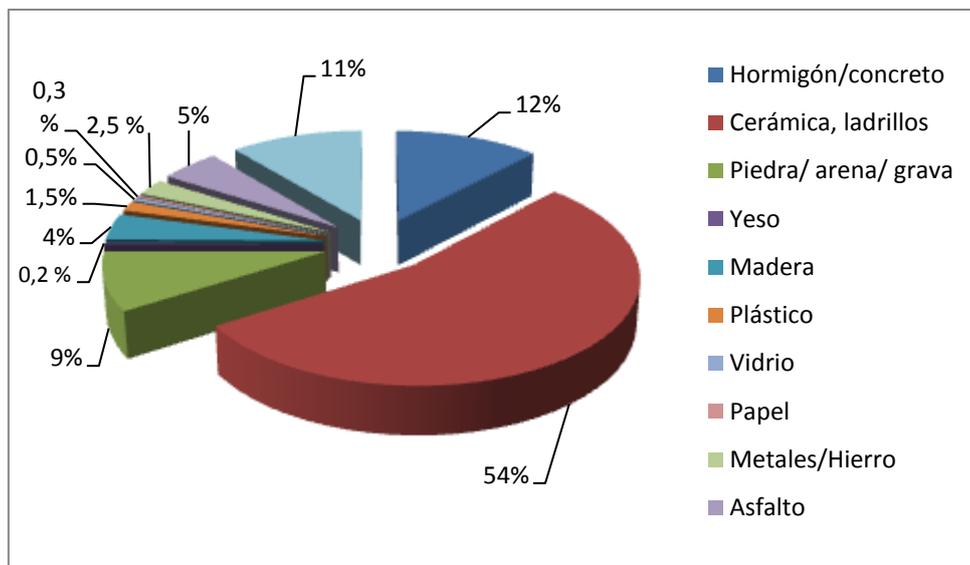
En el caso de construcción nueva, las diferencias en las columnas (1), (2) y (3), están dadas sobre todo por el tipo de materiales empleados. Así, la tercera por ejemplo, corresponde a una vivienda construida con mezclas de cemento y cerámico principalmente. La columna (4), correspondiente a una renovación de techos, indica una composición con mayor porcentaje de residuos de madera y tejados, y disminuye notablemente la fracción materiales con cemento. En el caso de demoliciones (5) y (6) se destaca el porcentaje de madera para la primera y el escombros para la segunda por tratarse en este caso de una edificación de varios pisos con importantes fundaciones. Las consideraciones realizadas demuestran que a los fines de estimar la composición de los RCD a nivel regional o nacional es necesario diseñar un plan de muestreo

específico y plantear metodologías con base estadística que consideren todos los tipos de obras que dan origen a los residuos.

Asimismo existen otros factores que influyen sobre el tipo y cantidad de RCD reportados en las fuentes de información de distintas ciudades o países, tales como la definición de RCD en las distintas legislaciones; el lugar de caracterización del RCD, según sea el punto de generación, la planta de reciclaje o el vertedero; y el parámetro de medida, volumen o peso.

La información sobre las cantidades generadas de RCD en distintas regiones es escasa y no siempre fiable; muestra de ello son las consideraciones sobre las estimaciones de generación de RCD que acompañan a los planes de gestión de RCD. Por ejemplo, en España, el II Plan Nacional de Residuos de la Construcción y Demolición 2008-2015, indica textualmente: "... se deduce que no existe información muy precisa sobre los residuos generados por el sector de la construcción ...” (MARM, 2008). España estima una generación per cápita que varía según las regiones siendo su valor medio de 790 kg/hab/año, con valores extremos entre 145 kg/hab/año en Ceuta y 1664 kg/hab/año en Castilla- la Mancha. Un estudio hecho en Florida (Cochran *et al.*, 2007) estimó 470 kg/hab/año, en Galicia 800 kg/hab/año (Martinez Lage *et al.*, 2010), en Tailandia 1000 kg/hab/año (Kofoworola *et al.*, 2009), en Japón 109 kg/hab/año y en Australia 427 kg/hab/año (Tam *et al.*, 2010). Por los datos mencionados se infiere que las variaciones son muy importantes entre ciudades o regiones y que es necesario estimar estas cantidades en el sitio específico donde se va a planificar su gestión.

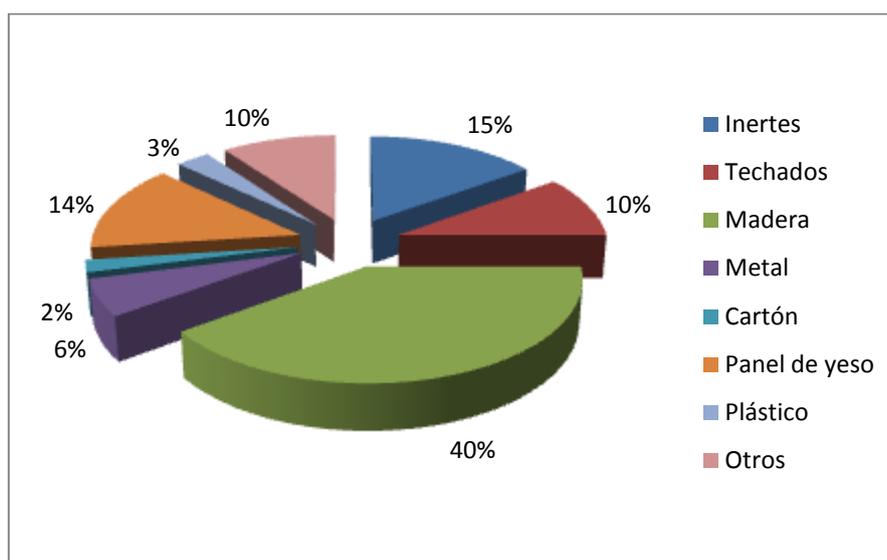
Los datos de composición son variables según la región por la predominancia de los materiales disponibles y utilizados en las construcciones. En regiones en que se construye preferiblemente con áridos y cerámicos, se han indicado porcentajes de entre 75% - 80% para la fracción inerte. El resto 20% - 25% corresponde a fracciones de RCD no especiales y peligrosos. Los porcentajes pueden variar según las categorías incluidas en la composición. Figura 1.3 muestra la distribución porcentual de las fracciones de RCD publicada en España (MARM, 2008).



**Figura 1.3.** Distribución porcentual en peso de RCD en España

En otros sitios con predominancia de madera en la construcción, la composición difiere de la anterior notablemente. Así la Figura 1.4 indica la composición en peso en New Hampshire (Carpenter, 2012). En la misma puede observarse que la fracción de madera juega un papel

predominante, seguida de la fracción inerte y los compuestos de yeso, constituyendo entre las tres un porcentaje del 70 % aproximadamente.



**Figura 1.4.** Distribución porcentual en peso de RCD en New Hampshire

En cuanto a la composición química de los RCD será diferente para cada fracción que se encuentre en su composición. En el caso de los RCD de la fracción hormigón, la composición química depende del árido utilizado (calizo o silíceo) en el hormigón original (CEDEX, 2009). En el caso del RCD cerámico, la composición química es muy heterogénea, dependiendo de las propiedades del componente principal. Como datos orientativos el CEDEX propone los mostrados en la Tabla 1.2 y 0 para dos fracciones mayoritarias en los RCD, la de hormigones de demolición y la de inertes cerámicos.

**Tabla 1.2** Composición química de los RCD de hormigón

Compuestos	RCD silíceo (%)	RCD calizo (%)
SiO <sub>2</sub>	45-60	4-5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15-20	1-2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2-5	1-2
CaO	5-7	52-54
MgO	0,5-1,5	0,2-0,8

**Tabla 1.3** Composición química de los RCD cerámicos

Compuestos	RCD cerámicos
SiO <sub>2</sub>	40-50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6-8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2-4
CaO	20-28
MgO	0-1

Estas características químicas de los RCD pueden tener influencia luego en los usos permitidos para los materiales recuperados como agregados secundarios o reciclados, por lo que en cada caso se deben conocer las propiedades locales para su utilización en reemplazo de áridos naturales.

### 1.2.3. Problemas ambientales derivados de los RCD

Al mencionar problemas ambientales nos referimos tanto a los impactos negativos sobre factores del ambiente, como a los problemas por desaprovechamiento de recursos no renovables debidos al manejo inadecuado de los RCD.

En cuanto a los primeros, en general es reconocido que los RCD presentan bajo riesgo a la salud humana y al ambiente, en relación con los residuos sólidos domiciliarios y se clasifican como no peligrosos. La problemática fundamental de gestión y disposición de los mismos se refiere a su gran volumen, y por lo tanto, a los impactos del transporte y la ocupación del suelo. En el pasado, se ha considerado que dado que la mayor parte de estos residuos son inertes no generarían lixiviados potencialmente peligrosos a las aguas subterráneas, superficiales o al suelo. Sin embargo diversas investigaciones que se referirán en los apartados siguientes han reportado impactos ambientales negativos debidos, sobre todo, al vertido sin control de terrenos y la formación de microvertederos.

Un resumen de los impactos ambientales y su relación a los factores afectados puede visualizarse en la Tabla 1.4, que los relaciona con los factores del medio afectados.

**Tabla 1.4** Impactos ambientales generados por los RCD

<b>Factores afectados</b>	<b>Impacto potencial identificado</b>
Medio Físico	Contaminación agua superficial
	Percolación de lixiviados en agua subterránea
	Contaminación del suelo
	Cambio en la forma del suelo (asociado a drenaje de agua superficial)
	Emisiones de sulfuro al aire
Medio biótico	Alteración de la vida acuática en cuerpos de agua
	Modificación de las condiciones para la flora y fauna
Medio perceptual	Degradación del paisaje
Medio socioeconómico	Devaluación de propiedades
	Aumento de costos de limpieza
	Transporte por rutas inadecuadas
	Propagación de vectores (enfermedades)

(Fuente: Mercante, 2005, modificado)

En lo que sigue se hará una breve referencia a los impactos mencionados en la Tabla 1.4 y al segundo de los problemas ambientales mencionados anteriormente, la pérdida de materiales residuales con opciones de valorización.

#### 1.2.3.1. Impactos sobre el medio físico y biótico

Las afectaciones al medio físico-biótico por la disposición sin control de los RCD han sido identificadas como contaminación del agua superficial y subterránea, por contacto directo o percolación de lixiviados respectivamente, contaminación del suelo, cambios en la morfología del suelo, emisiones gaseosas al aire y modificación para el desarrollo de flora y fauna.

Los impactos sobre aguas subterráneas pueden clasificarse de dos tipos: el primero por contaminación de cantidades traza de químicos peligrosos, principalmente metales pesados y

compuestos orgánicos. La fuente de los mismos es muy posible sean los químicos aplicados sobre diversos materiales de construcción o por disposición inadecuada de otros residuos que no pertenecen a la categoría de los RCD. El segundo tipo de contaminación detectada resulta de la presencia de grandes cantidades de químicos no tóxicos, que igualmente degradan la calidad del agua subterránea, tales como sodio y sulfatos, y que exceden límites secundarios del agua de bebida: olor, color y sabor.

Desde 1990, diversos estudios realizados por organizaciones tales como la US EPA (US EPA, 1995a y US EPA, 1995b), la Universidad de Florida y el *Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management* (Townsend *et al.*, 1998, Townsend *et al.*, 1999), han evaluado características de lixiviados de vertederos de RCD y los impactos que dichos vertederos ocasionaban en aguas subterráneas y superficiales.

US EPA (1995b) reporta los resultados de la investigación de once casos de vertederos que recibían predominantemente RCD. En ellos se intentó determinar la contaminación del agua subterránea y del agua superficial, y también el daño al medio biótico, tanto a comunidades acuáticas, como a la flora y fauna terrestres. En el caso del agua subterránea, la contaminación fue asociada a compuestos inorgánicos: hierro, manganeso, sólidos disueltos totales y plomo. Dos de ellos, hierro y manganeso, fueron hallados en valores 100 veces superior a los estándares aplicables al agua de bebida al menos en cinco de los once sitios estudiados. Con relación al agua superficial, seis sitios tenían problemas de contaminación. Al igual que en el agua subterránea, los valores elevados estaban asociados a constituyentes inorgánicos: se encontraron concentraciones de hierro, zinc, plomo, cobre y valores de acidez (pH) por encima de los límites fijados por EPA's Ambient Water Quality Criteria (AWQC) para la protección de la vida acuática. Dos de los sitios reportaron niveles elevados de sedimentos e hidrocarburos aromáticos polinucleares (PNAs). Los factores a los que se atribuyó la presencia de esos compuestos fueron la mezcla de RCD con residuos domiciliarios y neumáticos; la falta de protección inferior de membrana y la ausencia de un sistema de recolección de lixiviados como de una cobertura final de suelo.

En otro informe US EPA (1995a) se informó respecto a alteraciones en la calidad de aguas subterráneas producidas por lixiviado en 21 sitios de vertido de RCD. Se analizaron 93 parámetros y se compararon con los límites de agua apta para consumo humano. Siete de ellos presentaron problemas: 1-2 dicloroetano, cloruro de metileno, cadmio, hierro, plomo, manganeso y TDS. Para el hierro y manganeso los inconvenientes son de tipo estético por el sabor y olor que confieren al agua. No obstante, como conclusión de estos estudios la US EPA determinó que por la cantidad de sitios estudiados los resultados no eran concluyentes.

Posteriormente otros estudios se han llevado a cabo a fin de determinar el marco regulatorio de las condiciones de vertido de los RCD (Clark *et al.*, 2006; Ohio EPA, 2009). Ohio EPA (Ohio EPA, 2009) analizó el lixiviado de 30 sitios de vertido de RCD. Encontró que el lixiviado contiene una amplia variedad de elementos inorgánicos de los metales pesados, metales ligeros, elementos traza, y otros iones. También contiene una amplia variedad de compuestos orgánicos incluyendo los pesticidas, disolventes clorados, disolventes no clorados, gasolina, bencenos sustituidos, compuestos fenólicos, clorofluorocarbonos, hidrocarburos aromáticos policíclicos, ftalatos, alcanos y alcohol. El lixiviado de 29, de los 30 vertederos de RCD estudiados, tenía ocho o más parámetros que excedieron los estándares permitidos por razones de salud o de agua superficial. Concluye que los lixiviados de los sitios de vertido de Ohio representan una amenaza para la salud pública y el medio ambiente en caso de vertido a las aguas subterráneas o aguas superficiales. La amenaza se plantea por una variedad de compuestos orgánicos e

inorgánicos y metales. El grado de riesgo asociado con la amenaza de una migración depende de la forma en que los RCD estaban dispuestos, las condiciones del lugar y las circunstancias que rodean el sitio, que a menudo cambian con el tiempo. Finalmente aconsejan que la información suministrada por este estudio sea tomada en cuenta por los ciudadanos, los legisladores y las administraciones públicas en el desarrollo de políticas públicas y normas para la gestión de RCD y la concesión de permisos, construcción, operación, cierre y atención posterior al cierre de los vertederos de RCD.

En relación al recurso suelo, hay que tener en cuenta que en cada región el uso del mismo se realiza de manera diferente según las necesidades de la población y la disponibilidad de recursos, no atendiendo siempre a las limitaciones que cada sitio presenta en cuanto a la vulnerabilidad de sus ecosistemas. El impacto sobre el suelo de cualquier actividad humana, y particularmente el originado por la disposición de RCD, se manifiesta de dos formas: transformación y ocupación. La primera se refiere a los cambios en las propiedades químicas por la incorporación de metales y sustancias orgánicas (Weber *et al.*, 2002) tal como sucede con el agua subterránea, y a los cambios en propiedades físicas por la incorporación de materiales de distintas granulometrías a las propias naturales de los terrenos. La segunda se refiere a la ocupación física del suelo. Un ejemplo claro de la segunda es el impacto producido por el abandono de los residuos en áreas cercanas a las ciudades, de fácil acceso, que ha provocado alteraciones en los escurrimientos naturales de las aguas y en cauces artificiales. Por ejemplo, en la ciudad de Mendoza, Argentina se han ocupado clandestinamente con RCD los cauces aluvionales y de drenaje que evacúan las aguas de lluvia en la época estival (Mercante *et al.*, 2009).

Investigaciones realizadas sobre emisiones gaseosas de los sitios de disposición clandestina de RCD han confirmado la presencia de ácido sulfhídrico ( $\text{SH}_2$ ). Estos gases son producto de la degradación biológica de restos de paneles de yeso u otros materiales con yeso en condiciones anaeróbicas y generan problemas de olores y algunas afecciones a la salud de los empleados y residentes cercanos (Lee *et al.*, 2006; Plaza *et al.*, 2007; Eun *et al.*, 2007; Anderson *et al.*, 2010).

### **1.2.3.2. Impactos sobre el medio perceptual**

El paisaje es un concepto que puede calificarse como primitivo, ya que cualquier individuo tiene una idea más o menos clara o acertada de lo que es el paisaje y concretamente en el sentido en que se comprende como escenario en que las personas desarrollan sus actividades o esparcimiento. Dicho de otra manera el paisaje es una construcción humana que recoge el medio natural, las percepciones individuales y las transformaciones culturales que la sociedad ejerce sobre los lugares.

En el caso de los vertidos en terreno sin control, ya sea en forma de microvertederos o vertederos clandestinos en grandes depresiones del terreno, en los que son visibles los residuos, no cabe duda que este hecho afecta la apreciación por parte de la población de áreas que anteriormente pudieron ser atractivas por su calidad paisajística. Por lo tanto, hay una pérdida del disfrute de los valores recreativos y estéticos en el área degradada por disposición de residuos sólidos.

### **1.2.3.3. Impactos sobre el medio socioeconómico**

La generación de pasivos ambientales, en terrenos públicos o privados, evidentemente devalúa las propiedades, pues ya tienen un incluido un costo de remediación que afrontar

(Llamas *et al.*, 2011). En el caso de las propiedades públicas, los costos de limpieza son aportados por las administraciones gubernamentales.

El transporte de residuos al sitio de vertido en vehículos de carga por rutas inadecuadas genera un impacto ambiental que está asociado al deterioro de vías que no han sido proyectadas para tal fin. Evidentemente que los caminos de ingreso a los sitios de vertido clandestinos no tienen un control ni planificación previa. Por otra parte, las molestias por ruidos, emisiones de polvo, obstrucción del tránsito son impactos frecuentes durante el transporte.

Respecto a la relación entre escombreras y propagación de vectores, en Brasil (Marques Sampaio *et al.*, 2009) se realizó un estudio en Rio de Janeiro basado en la interrelación entre salud y saneamiento. Se detectó una relación directa entre las tasas de incidencia del dengue y la formación de vertidos sin control de RCD. La investigación concluye que hay una fuerte necesidad de aplicar sistemas de reciclaje de escombros de construcción como una medida de saneamiento a fin de promover la reducción de la incidencia del dengue, en la ciudad estudiada. Con relación a este tema, cabe agregar que si bien los RCD poseen muy poca fracción orgánica, el problema de la proliferación de vectores ocurre además porque el manejo sin control hace que se mezclen con otros residuos más propensos a albergar microorganismos y roedores.

#### **1.2.3.4. Pérdida de materiales recuperables**

Los RCD, como ya se ha mencionado, se caracterizan por generarse en gran cantidad (masa y volumen) de ahí su importancia y la prioridad que tienen en muchas regiones en cuanto a la preocupación por su gestión. Esta misma razón, sumada a que su mayor componente corresponde a la fracción de materiales inertes, hace que sea posible y conveniente su retorno al mercado en materiales de construcción en pos del ahorro de los recursos naturales.

#### **1.2.4. Opciones de valorización de los RCD**

La valorización se define como todo procedimiento que permita el aprovechamiento de los recursos contenidos en los residuos. Estos recursos pueden ser energéticos o materiales. En el caso de los RCD, dado que la mayor fracción corresponde a los residuos inertes, existe una mayor posibilidad de recuperación material en comparación con la energética.

Un aspecto importante a considerar es que, como en otros tipos de residuos, aquellos más homogéneos son los que usualmente se aprovechan para la fabricación de los mismos productos u otros de menor valor añadido. Mientras que los residuos más mezclados o heterogéneos, son principalmente valorizados usándolos como combustible alternativo en procesos industriales o como fuente de energía en procesos de combustión. En lo que sigue se describen las posibilidades de valorización más comunes en los sistemas de gestión integral de RCD (SGIRCD).

##### **1.2.4.1. Reutilización**

La acción de reutilizar involucra la aplicación de un material residual, de modo que mantiene su forma e identidad original; es decir, la recuperación de elementos constructivos completos y el reuso con las mínimas transformaciones posibles, lo que conduce además a la reducción de los residuos. Durante el proceso de construcción, se generan algunos residuos reutilizables procedentes de los materiales propios de las obras y otros de los materiales auxiliares, tales como encofrados de madera y metálicos, andamios o sistemas de protección y seguridad; también embalajes y envases como grandes contenedores, silos y pallets.

En los procesos de demolición y aplicando técnicas de “deconstrucción”, se pueden recuperar elementos tales como tejas, carpintería metálica y de madera, techados, entre otros. Varias guías han sido elaboradas por distintos centros de estudios para fomentar la reutilización de RCD en la misma obra civil (ITeC, 2000; EVE *et al.*, 2006; Ihobe, 2009).

#### 1.2.4.2. Reciclaje

La actividad del reciclaje se refiere a la operación que incorpora los residuos en un proceso en el que requerirán ser tratados y luego sometidos a un proceso de elaboración junto con otros insumos. Es una de las estrategias de gestión de los residuos sólidos, en general, y de los RCD en particular, igual de útil que el vertido, pero ambientalmente preferible.

En países desarrollados, el apoyo estatal al reciclaje responde a una amplia demanda por parte de la población y es practicado con los RCD desde la década de los ochenta. Cabe reseñar que sólo en Japón (Tam, 2009) o en varios países de Europa (Spoerri, 2009) entre otros, el reciclaje comenzó en la II Guerra Mundial con la recuperación de bloques de las construcciones destruidas para reconstruir edificaciones. En cambio, en el resto de los países de Asia el reciclaje ha comenzado recientemente por causa del uso sustentable de materiales y del suelo (Tam *et al.*, 2006; 2010).

En países en vías de desarrollo, el aprovechamiento de RCD estuvo reducido a actividades de recuperación informal y venta, hasta fines de los años noventa, cuando se comenzó con la instalación de plantas para reciclar los materiales recuperados, simultáneamente con la aparición de normativas nacionales. Dos ejemplos latinoamericanos lo constituyen Brasil, que instala su primera planta en 1986 (Pinto, 1999) y posteriormente México, donde a partir del año 2004 se pone en marcha la primera planta de reciclaje y única en el país, en el Distrito Federal (Concretos Reciclados S.A.).

Desde el punto de vista económico, el reciclaje es una actividad industrial que conlleva la generación de empleos y renta pública. Sin embargo, para que tenga éxito es imprescindible la existencia de un mercado que absorba los materiales generados de forma eficiente. Al inicio de la implementación de un sistema de gestión de RCD, la actividad de obras públicas debe ejemplificar con el empleo de áridos reciclados. En este sentido, son necesarias normas técnicas, que caractericen el material y fijen los límites de calidad para diversos usos, todo ello amparado en legislación y fiscalización efectivas. Una investigación realizada en Australia (Tam, 2008) sobre las consideraciones económicas en el reciclaje de residuos de hormigón ha mostrado un beneficio neto del reciclaje del mismo sobre la práctica de vertido. En este caso se comparó el costo de disponer residuos de hormigón en vertedero sumado al costo de producción de áridos naturales, con el costo de reciclaje del mismo.

Dada la creciente preocupación en algunos países por la protección del ambiente y del desarrollo sustentable, se han introducido legislación y medidas de control que conducen al reciclaje. Estas se traducen en incentivos, tales como elevadas tasas por disposición en terreno y costos altos de vertido, e imposición de tasas en el uso de materiales vírgenes. Estos incentivos conducen a inversiones en instalaciones de clasificación y reciclaje para la producción de agregados reciclados. Esta política ha sido establecida particularmente en Europa y el sudeste asiático.

Además de la viabilidad técnica y económica de los materiales reciclados, se debe estudiar su impacto ambiental, esto es, el análisis “de la cuna a la tumba” durante la etapa de fin de vida, en el marco de una gestión integral y sostenible de los RCD. Por otra parte, se puede incluir en

la evaluación la carga evitada por la sustitución del material virgen y compensar las cargas ambientales del reciclaje en una consideración más equitativa (Mercante *et al.*, 2012).

En los párrafos que siguen se hará una referencia breve a las características del reciclaje de las distintas fracciones de materiales halladas en los RCD.

#### *Reciclaje de la fracción Inerte*

La naturaleza de los materiales que componen los RCD determina cuáles son reciclables y cuál es su utilidad potencial. Los residuos pétreos, hormigones y ladrillos principalmente, que componen la fracción inerte pueden ser reintroducidos en las obras como material de relleno, una vez que hayan sido sometidos a un proceso de trituración y tamizado. También esta fracción ha sido utilizada en bases de caminos en varios países de Europa con muy buenos resultados y sobre todo en obras públicas (Tam *et al.*, 2007; Jiménez *et al.*, 2010). Otros usos son la fabricación de premoldeados no estructurales como los bloques de concreto con muy buenos resultados (Sousa *et al.*, 2003; Carneiro, 2005; Cachim, 2009), la construcción de estacas de compactación como mejoradores de suelos arenosos (Gusmão, 2008; Alves de Medeiros *et al.*, 2009) y la construcción de drenajes para vertederos de residuos sólidos urbanos (Affonso, 2005); o con otras funciones.

Más recientemente, muchos laboratorios han investigado aplicaciones del hormigón residual en hormigones y morteros nuevos (Huete Fuertes *et al.*, 2005; Rolón Aguilar *et al.*, 2007; Kou *et al.*, 2009; Padmini *et al.*, 2009; Domingo-Cabo *et al.*, 2009; Tabsh *et al.*, 2009). Los mismos han analizado y comparado propiedades del hormigón fresco y endurecido, tales como resistencia a la compresión y absorción. Estos estudios concluyen que los áridos reciclados procedentes de hormigón presentan un elevado nivel de poros, con posibilidad de absorber más agua en el reemplazo de áridos naturales, y sus variaciones dependen del tipo de hormigón original y de su estado de conservación. Estas incertidumbres limitan el uso de agregados reciclados en estructuras y se tienden a usar sólo fracciones de estos. No obstante, algunos estados europeos, Japón y otras agencias estatales de EE.UU. han modificado sus especificaciones de materiales en el uso de agregados reciclados en proyectos de construcción.

Algunos estudios sostienen que la incorporación de aditivos super-plastificantes mejoran la absorción de agua (González Fonteboa *et al.*, 2010) y también se ha comprobado la mezcla de áridos reciclados finos con cenizas volantes y escorias de alto horno con buenos resultados en las propiedades del hormigón y mortero en distintas proporciones (Kou *et al.*, 2009; Berndt, 2009).

Otro estudio de dosificaciones y caracterización de morteros elaborados con áridos reciclados de hormigón concluye que los morteros de albañilería con base de cemento pueden incorporar como máximo un 20-25% de árido reciclado sin evidenciar pérdidas significativas de calidad (Vegas, 2009). Las características limitantes del árido reciclado para su uso en morteros de albañilería resultan ser la alta absorción y el elevado contenido en sulfatos, en comparación con las arenas naturales, de ahí la proporción límite especificada. La inclusión de agregados reciclados de ladrillos cerámicos en reemplazo de arena en morteros fue experimentada por Bektas *et al.* (2009) quien evaluó sus efectos en la durabilidad del mortero. El estudio demostró que un reemplazo de hasta del 20% no afecta la reacción álcali-sílice, y por lo tanto, la calidad del mortero.

A fin de minimizar los impactos ambientales de los agregados reciclados de hormigón por los lixiviados que pudieran alcanzar el suelo o el agua subterránea se han realizado investigaciones al respecto por Engelsen *et al.*, (2009) cuyos resultados han dado lugar a la

adopción de normas relativas a los límites aceptables para el contenido de contaminantes en materiales reciclados en la construcción de carreteras (Petkovic *et al.*, 2006).

Según la Asociación Española de Gestores de RCD (GERD, 2010) la fabricación y comercialización de áridos reciclados constituye el objetivo básico de la gestión medioambiental de los residuos de construcción y demolición. El porcentaje de reciclaje es el indicador que muestra el nivel de maduración del sector del reciclaje, así como la eficiencia del conjunto del sector de la construcción traducida en recuperar una parte de los recursos naturales no renovables que consume.

#### *Reciclaje de la fracción Madera*

La madera también es factible de reciclar, triturada y utilizada en la fabricación de placas aglomeradas, o triturada para ser usada como combustible en calderas y recuperar su energía (Lund, 1996), natural o en pellets. Algunos estudios sobre la conveniencia de una valorización u otra han sido realizados. Rivela *et al.*, (2006) analizó alternativas para tratar placas aglomeradas de madera en desuso. Llegó a la conclusión que su reciclaje era una opción preferible a su uso como combustible desde una perspectiva ambiental. Otro tipo de valorización de madera estructural fue estudiada por Gaskin *et al.*, (2004). En este caso se investigó el uso de la madera triturada como capa de protección del suelo contra erosión y la posible migración de compuestos químicos adheridos (tales como adhesivos o pinturas). Los resultados indicaron que estos residuos de madera se pueden reutilizar beneficiosamente en lugar de ir a un relleno sanitario.

Un limitante en la valorización de la madera es el hecho de que haya sido tratada. Las sustancias químicas utilizadas como preservantes incluyen frecuentemente el CCA (arseniato de cobre cromatado) que contaminan los productos reciclados de madera. Por este motivo, es necesario detectar la madera tratada en las plantas de reciclaje y separarla del material a triturar. Esto puede realizarse de forma manual teniendo en cuenta el uso original de la madera, por el color verde oliva, o bien, estudios recientes han propuesto nuevas tecnologías de detección automatizadas para plantas de reciclaje de madera a escala industrial (Hasan *et al.*, 2011).

En todos los casos habrá que cumplir con la legislación nacional referente a sustancias peligrosas para la consideración de su reciclaje (Townsend *et al.*, 2003).

#### *Reciclaje de la fracción Cartón- papel*

La fracción cartón-papel, así como el plástico, vidrio, metal y yeso se introducen en el ciclo productivo del material virgen con condiciones de pureza determinadas y con ciertas limitaciones.

La fracción cartón-papel, se compone en realidad de un 90% de cartón, en general procedente de los embalajes de los materiales de construcción y de los artefactos que se instalan en la etapa de equipamiento de las obras edilicias, por ejemplo. La comercialidad de los mismos depende de su limpieza respecto a contaminantes como: plásticos, polvo propio de la construcción, cartones publicitarios con tintas, maderas o residuos orgánicos.

#### *Reciclaje de la fracción Plástico*

Los residuos plásticos que se encuentran en los RCD provienen de embalajes plásticos y film de los materiales de construcción, tuberías, tubos de cableado y cables, principalmente PVC. Particularmente en las obras de demolición se originan por productos de plástico incorporados como pisos, membranas o poliestireno expandido. Son poco atractivos para la recuperación por su alto coste de separación, especialmente el de los cables de los que se recupera el metal (Elías

Ed. 2009b). Por otra parte, las distancias desde las plantas de clasificación hasta el sitio de reciclaje, condicionan su aprovechamiento.

Los plásticos residuales, representan un bajo porcentaje en peso de la composición de los RCD, 1% -1,5 %. Sin embargo, en términos globales de uso de plástico, el sector de la construcción representa un 20% del consumo total del material, por ejemplo en la Unión Europea. Esto ha dado lugar a que se analicen las ventajas y conveniencia de diferentes opciones de reciclado a través del Programa Life Appricod Proyect (Life Appricod Project Guide, 2006) específicamente para plásticos procedentes de los RCD. Una de sus principales conclusiones es que “los plásticos clasificados deben ser lo suficientemente puros y bien ordenados para responder a la demanda de reciclaje, y deben ser compatibles con las técnicas de procesamiento para ser utilizados como materia prima secundaria”.

#### *Reciclaje de la fracción Vidrio*

La fracción residual de vidrio se genera en obras nuevas en muy poca cantidad, y en el caso de demoliciones no suele ser un objetivo prioritario su selección, por lo que con frecuencia no aparece como un componente típico en la actualidad (Bustillo, 2010). El uso del vidrio recuperado en la fabricación del vidrio tiene la ventaja de ahorrar energía en los altos hornos, pues el vidrio residual funde a menor temperatura que la materia prima virgen utilizada para su obtención. Es importante señalar que el reciclaje de vidrio necesita un 26% menos de energía que la producción original. No se cuenta con datos de producción de vidrio 100% virgen, ya que siempre se utiliza una fracción de recuperado (McDougall *et. al.*, 2004). Sin embargo, su reciclaje requiere ciertas condiciones, por ejemplo, una pureza del 99% en el caso del vidrio transparente y del 90% para los vidrios de color marrón y verde (Elías Ed., 2009c). Es por este motivo que se suele reciclar, además, con otros usos tales como glasfalto, microesferas de vidrio, mosaicos de vidrio, agregado de vidrio en sustitución de agregado natural (Castro y Brito, 2013, entre otros).

#### *Reciclaje de la fracción Metal*

La cantidad de metales presentes en la composición de los RCD en general es muy poca (caso España, 2,5 %). Sin embargo, algunos procesos de demolición o construcción pueden tener mayores porcentajes. En rigor, deben considerarse las fracciones de metales férricos y no-férricos, habiendo dentro de cada categoría otras tantas subdivisiones. Por lo general, los metales con valor de mercado como el cobre y aluminio, no llegan a las plantas de clasificación, siendo desviados desde las obras hacia centros de recuperación, por lo que es difícil su cuantificación. En las plantas, se separan los férreos mediante electroimanes y el resto en forma manual donde aparecen elementos galvanizados y cobre, entre otros, y se comercializa como chatarra.

#### *Reciclaje de la fracción Yeso*

El yeso es una fracción residual menor en la mayoría de las construcciones que ronda valores de composición del 4% en peso. En condiciones de aplicación húmeda, el descarte por sobrante, fragüe, caídas o rechazo de demoliciones suele tener por destino final los vertederos. Sin embargo, este recurso mineral natural no renovable es reciclable, dado que las propiedades aglomerantes del yeso fraguado pueden ser recuperadas a partir del secado a diferentes temperaturas. En Argentina, ensayos demostraron que la incorporación al yeso comercial de residuos de yeso recuperado de obras sometidos a un proceso de molienda y secado de 100°C a 140°C, en porcentajes variables de hasta el 30% en peso, permite obtener muestras que conservan sus propiedades aglomerantes, con tiempos de inicio y final de fragüe enmarcados

dentro de los requisitos de normas argentinas y chilenas para yesos calcinados (Begliardo *et al.*, 2012). Varios estudios en Brasil han demostrado sus posibilidades de reciclaje en ciertas proporciones y con excelentes resultados (Ribeiro, 2006; Nita *et al.*, 2010; Pinheiro, 2011).

#### **1.2.4.3. Recuperación de áreas**

La valorización de los RCD como recuperación de materia de los residuos se relaciona con su utilización en la restauración de áreas degradadas por extracción de minerales con el fin de lograr su integración ambiental y paisajística. Las canteras ya explotadas o abandonadas, generan impactos negativos sobre el medio ambiente siendo algunos de los más evidentes la aparición de lagos en el interior de las cotas mineras, la existencia de surgencias de drenaje, pero también problemas de desprendimientos, erosión e incidencia negativa sobre el paisaje. Aquellas en las cuales se realizaba extracción de arcillas, por su baja permeabilidad, y las que por su ubicación respecto al núcleo urbano sean convenientes, constituyen un hueco idóneo para su utilización como vertedero (García-Piñón *et al.*, 2008).

Un proyecto de recuperación de áreas degradadas por actividad minera puede cumplir con varios objetivos, tales como (Casado, 2009):

- ordenar el territorio de manera que se integren ambiental, territorial y socialmente las zonas incluidas en tal proyecto.
- restaurar el medio natural y conservar el patrimonio cultural
- proteger el ecosistema y favorecer el desarrollo de la fauna y flora autóctonas
- preservar y proteger las antiguas explotaciones mineras (canteras) para que no representen peligro para los ciudadanos.
- repercutir en la calidad, percepción y disfrute del medio ambiente por parte del sector turístico.

Los materiales ideales son los RCD inertes, o los RCD mezclados cuyo reciclaje es dificultoso justamente por su heterogeneidad, en ambos casos que no contienen residuos peligrosos. Las áreas degradadas por explotación de canteras son los lugares prioritarios para disposición final de la fracción inerte de los RCD (Mercante, 2005). Los factores más importantes a tener en cuenta para el aporte de materiales residuales a un área degradada se guían por los siguientes criterios:

- su proximidad a espacios naturales declarados protegidos
- ser zona de interés por su potencial medioambiental
- estar próximas a entornos urbanos cuya población se verá directamente beneficiada.
- su factibilidad ambiental y la potencialidad de mitigar los impactos por la propia actuación de restauración.

Respecto de la recuperación de canteras se han elaborado guías que contienen los requisitos y exigencias para lograr el objetivo propuesto, tal como la elaborada por Imbach *et al.*, (2004) y ITGE, (2004).

#### **1.2.4.4. Valorización energética**

La valorización energética implica recuperar energía de los residuos. El objetivo es eliminar su toxicidad y a la vez aprovechar el calor sensible contenido en los gases, por lo que en este caso el poder calorífico del material residual será la variable principal a tener en cuenta. Las tecnologías de valorización energética que se utilizan en el caso de los residuos sólidos en general, son: pirólisis, gasificación e incineración con recuperación energética o co-incineración. Es poco probable que los RCD se sometan a algunas de ellas, debido a su

naturaleza inerte en la mayor parte. Sin embargo, puede ejecutarse con las fracciones de papel, plásticos, maderas y algunos componentes peligrosos, tales como restos de pinturas, asfaltos, envases de pinturas y solventes. Dado su potencial de contaminación atmosférica debido a las emisiones gaseosas al aire, esta es la opción menos preferida de entre las que corresponden a la valorización en la jerarquía de residuos, pero puede justificarse considerando un enfoque y análisis global en el caso particular de que se trate.

En el caso de la madera, resulta una fracción residual muy factible de sustituir algún combustible fósil. Según Sathre (2007), la madera residual de construcción que tradicionalmente se ha dispuesto en vertederos de residuos de construcción y demolición, puede ser una fuente de biocombustible valiosa para el sector de la energía. Sin embargo, el mismo autor aclara que el aprovechamiento energético de la madera residual de construcción existe integrado a otras actividades tales como la forestal e industrial.

### **1.3. Aspectos normativos relativos a los RCD**

El problema ambiental ya planteado para los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) ha generado que en los últimos años se haya iniciado un impulso legislativo que se encuentra en diferente nivel de desarrollo e implementación dependiendo del país o región, debido a razones de índole ambiental, económica, política y cultural. La normativa que regula los RCD posee características comunes como así también diferencias según las necesidades propias de cada país. Asimismo, el enfoque básico de las herramientas legislativas corresponde a dos características principales: las regulaciones de final de proceso y las regulaciones con objetivos estratégicos (McDougall *et al.*, 2004).

Las primeras son regulaciones técnicas sobre las salidas, es decir se relacionan con los procesos individuales de tratamiento y disposición de residuos. Los límites sobre las emisiones gaseosas de incineradores, por ejemplo, ilustran este tipo de legislación. Estas normas son importantes para garantizar la operación segura de las instalaciones de tratamiento, promueven a su vez el uso de la mejor tecnología y prácticas disponibles. Sin embargo, no conducen a cambios mayores en la manera que opera el sistema de residuos.

Las segundas se están utilizando cada vez más para definir la manera en que se manejarán los residuos en el futuro. Este tipo de regulaciones tiene dos aspectos comunes: se desarrolla bajo la “jerarquía de residuos”, y en este contexto establece metas para la recuperación y el reciclaje de materiales; varias legislan sobre fracciones específicas del flujo de residuos y no lo consideran como un todo, por ejemplo la referida a envases y embalajes. Este último aspecto hace que esas medidas tengan un bajo impacto en el escenario global del manejo de los residuos sólidos.

#### **1.3.1. Europa**

En Europa la legislación es muy amplia, dado que incluye legislación europea, estatal, autonómica y local. A nivel europeo no existe legislación específica sobre RCD, por lo que les afecta la legislación general sobre residuos.

El VI Programa de acción de la CE en materia de medio ambiente (UE, 2001) destaca la necesidad de incluir en las acciones comunitarias la armonización de la legislación, aspecto ya considerado en la primer ley de residuos, la Directiva 75/442/CEE. Esta norma en su articulado, define qué es un “residuo”, introduce la jerarquía de gestión y el principio de “quien contamina paga” y establece las líneas de gestión básicas para los planes de los estados miembros. La política comunitaria en materia de residuos se inspiró posteriormente en esta ley, dando lugar a

diversas resoluciones y a la inclusión de las estrategias de gestión de residuos en los Programas de Acción de la Comunidad Europea en Materia de Medio Ambiente, siendo el último, el Sexto Programa presentado para el periodo 2001-2012 (UE, 2001). Este programa se concentra en cuatro líneas de acción prioritarias: el cambio climático, la biodiversidad, el medio ambiente y la salud, y la gestión sostenible de los recursos y los residuos.

Por lo que se refiere a residuos sólidos se establecen objetivos de reducción en la cantidad final generada de 20% para 2010 y de 50% para 2050. Para el logro de estos objetivos se plantean acciones estrechamente vinculadas a la gestión de recursos, tales como: a) estrategias para la reducción del consumo, b) fiscalización de la utilización de recursos, c) eliminación de subvenciones que fomentan el uso excesivo del recurso, d) inclusión del principio de utilización eficaz de los recursos en el marco de la política integrada de producto, e) diseño de estrategias de reciclado de residuos, f) mejora de los sistemas existentes de gestión de residuos e inversión en la prevención cuantitativa y cualitativa, entre otros.

Desde el año 1975 hasta el presente se han dictado numerosas resoluciones y directivas, que conforman actualmente la legislación europea sobre residuos. En la Tabla 1.5 se listan varias de ellas. De estas normas se comentan a continuación la Directiva del Consejo 1999/31/CE relativa al vertido de residuos (CE, 1999), la Decisión 2003/33/CE del Consejo (CE, 2003), por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en vertederos, y la Directiva 2008/98/CE (CE, 2008) del Parlamento Europeo y del Consejo sobre los residuos.

**Tabla 1.5** Legislación europea sobre residuos

- |  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Directiva 91/156/CEE, del 18 de marzo de 1991, por la que se modifica la Directiva 75/442/CEE, relativa a los residuos.</li><li>• Directiva del Consejo 91/689/CEE, del 12 de diciembre de 1991, relativa a residuos peligrosos.</li><li>• Resolución del Consejo, del 24 de febrero de 1997, sobre una estrategia comunitaria de gestión de residuos.</li><li>• Directiva del Consejo 1999/31/CE, 26 de abril, relativa al vertido de residuos.</li><li>• Decisiones de la Comisión, 2001/118/CE, de 16 de enero de 2001; 2001/119/CE, del 22 de enero de 2001; Decisión 2001/573/CE del Consejo, de 23 de julio de 2001, por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE de la Comisión, de 3 de mayo de 2000, en lo que se refiere a la lista de residuos.</li><li>• Decisión 2003/33/CE del Consejo, del 19 de diciembre de 2002, por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en vertederos, con arreglo al Art. 16 y al Anexo II de la Directiva 1999/31/CEE.</li><li>• Directiva 2006/12/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de abril de 2006, relativa a los residuos.</li><li>• Reglamento (CE) N° 1013/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo relativo al traslado de residuos (que sustituye al Reglamento N° 259/93 a partir del 12 de julio de 2007)</li><li>• Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.</li></ul> |
|--|

En la Directiva 1999/31/CE (CE, 1999) se señalan los requisitos que deben exigirse a los vertederos en cuanto a localización, gestión, control, cierre y medidas de prevención que deben tomarse para evitar daños al medio ambiente. Por otra parte, se definen las clases de vertederos, tipificadas en tres: para residuos no peligrosos, peligrosos e inertes y establece que debe contarse con los criterios de admisión suficientes y procedimientos de aceptación de residuos según el tipo de vertedero y se establece que sólo podrán depositarse en un vertedero residuos que hayan sido tratados. Otro de los conceptos básicos manejados en esta Directiva es que el aprovechamiento de residuos inertes o no peligrosos apropiados para obras de restauración no

constituye necesariamente una actividad de vertido (artículo 3.2.2º) y prevé un vertedero específico únicamente para los residuos inertes (artículo 4 y 6.d).

La Decisión 2003/33/CE del Consejo (CE, 2003) establece los procedimientos y criterios por el cual se admiten residuos en vertederos, cuyos aspectos más importantes, se resumen en la Tabla 1.6.

**Tabla 1.6** Procedimientos de admisión de residuos en vertederos (CE, 2003)

1.	Procedimientos de admisión de residuos
1.1	Caracterización básica
1.2	Pruebas de conformidad
1.3	Verificación in situ
2.	Criterios de admisión de residuos
2.1	Criterios para vertederos de inertes
2.1.1	Lista de residuos admisibles sin realización de pruebas previas
2.1.2	Valores límites de lixiviación y de contenido total de parámetros orgánicos
2.2	Criterios para vertederos de residuos no peligrosos
2.2.1	Residuos admisibles sin realización de pruebas previas
2.2.2	Valores límites para residuos no peligrosos
2.2.3	Residuos de yeso
2.3	Criterios para residuos peligrosos admisibles en vertederos de residuos no peligrosos
2.3.1	Valores límites de lixiviación
2.3.2	Otros criterios
2.3.3	Residuos de amianto
2.4	Criterios para los residuos admisibles en vertederos para residuos peligrosos
2.4.1	Valores límite de lixiviación
2.4.2	Otros criterios

La Directiva sobre residuos 2008/98/CE (CE, 2008), intenta contribuir a ir transformando la UE en una “sociedad del reciclado”, que trate de evitar la generación de residuos y que utilice los residuos como un recurso.

A partir del 12 de diciembre de 2010 quedaron derogadas la Directiva 75/439/CEE, del Consejo, relativa a la gestión de aceites usados, la Directiva 91/689/CEE del Consejo, relativa a los residuos peligrosos y la Directiva 2006/12/CE, relativa a los residuos. La Directiva 2006/12/CE (CE, 2006) establecía el marco legislativo para la manipulación de residuos en la Comunidad Europea. En ella se definieron conceptos clave tales como residuo, valorización y eliminación y se establecen los requisitos esenciales para la gestión de residuos, en particular la obligación de que las entidades o empresas que lleven a cabo operaciones de gestión de residuos tengan una autorización o estén registradas, la obligación de que los Estados miembros tengan planes de gestión de residuos, y otros principios fundamentales, como la obligación de manipular los residuos de manera que no causen un impacto negativo en el medio ambiente y la salud, el fomento de la aplicación de la jerarquía de residuos y, de conformidad con el principio «quien contamina paga», el requisito de que los costes de la eliminación de los residuos recaiga sobre el poseedor de los residuos o el anterior poseedor, o el productor del producto del que proceden los residuos.

La nueva Directiva de 2008 (CE, 2008) mantiene el objetivo de proteger el medio ambiente y la salud humana mediante la prevención o la reducción de los impactos adversos de la generación y gestión de los residuos, pero refuerza la reducción de los impactos globales del uso de los recursos y la mejora de la eficacia de dicho uso.

Define el “Fin de la condición de residuo”, concepto por el cual determinados residuos específicos dejarán de ser residuos, en el sentido en que se definen en el artículo 3, punto 1,

cuando hayan sido sometidos a una operación, incluido el reciclado, de valorización y cumplan los criterios específicos que se elaboren, con arreglo a las condiciones siguientes:

- la sustancia u objeto se usa normalmente para finalidades específicas;
- existe un mercado o una demanda para dicha sustancia u objeto;
- la sustancia u objeto satisface los requisitos técnicos para las finalidades específicas, y cumple la legislación existente y las normas aplicables a los productos; y
- el uso de la sustancia u objeto no generará impactos adversos globales para el medio ambiente o la salud humana.

Otro concepto importante es el de “subproducto” estableciéndose específicamente como una sustancia u objeto resultante de un proceso de producción cuya finalidad primaria no sea esa sustancia u objeto, si se cumplen las siguientes condiciones:

- es seguro que la sustancia u objeto va a ser utilizado ulteriormente;
- puede utilizarse sin tener que someterse a una transformación distinta al proceso industrial normal;
- la sustancia se produce como parte integrante de un proceso de producción;
- el uso ulterior es legal y no afecta el medio ambiente o la salud humana.

La norma específica que “deberán tenerse en cuenta criterios de fin de la condición de residuo al menos, entre otros, para los áridos, el papel, el vidrio, el metal, los neumáticos y los textiles”.

El principio de quien contamina paga es un principio rector a escala europea e internacional. La introducción de la responsabilidad ampliada del productor en la Directiva 2008/98/CE (CE, 2008) constituye uno de los medios para apoyar el diseño y fabricación de bienes que tengan plenamente en cuenta y faciliten el uso eficaz de los recursos durante todo su ciclo de vida, incluidos su reparación, reutilización, desmontaje y reciclado sin perjudicar a la libre circulación de bienes en el mercado interior. Este último concepto habilita a los estados miembros a establecer medidas legislativas o no legislativas para incluir, entre otras cosas, la aceptación de los productos devueltos y de los residuos que queden después de haber usado dichos productos, así como la subsiguiente gestión de los residuos y la responsabilidad financiera de estas actividades. Estas medidas podrán incluir la obligación de ofrecer información accesible al público sobre en qué medida el producto es reutilizable y reciclable.

La citada Directiva plantea los siguientes objetivos de reutilización y reciclaje:

- antes de 2020, deberá aumentarse como mínimo hasta un 50 % global de su peso la preparación para la reutilización y el reciclado de residuos de materiales tales como, al menos, el papel, los metales, el plástico y el vidrio de los residuos domésticos y posiblemente de otros orígenes en la medida en que estos flujos de residuos sean similares a los residuos domésticos;
- antes de 2020, deberá aumentarse hasta un mínimo del 70 % de su peso la preparación para la reutilización, el reciclado y otra valorización de materiales, incluidas las operaciones de relleno que utilicen residuos como sucedáneos de otros materiales, de los residuos no peligrosos procedentes de la construcción y de las demoliciones, con exclusión de los materiales presentes de modo natural definidos en la categoría 17 05 04 de la lista de residuos.

Establece los principios de autosuficiencia y proximidad: los Estados miembros tomarán las medidas oportunas, en cooperación con los demás Estados miembros cuando sea necesario o aconsejable, para establecer una red integrada y adecuada de instalaciones de eliminación de

residuos y de instalaciones para la valorización de residuos municipales mezclados recogidos de hogares privados, incluso cuando dicha recogida también abarque tales residuos procedentes de otros productores, teniendo en cuenta las mejores técnicas disponibles. Establece los lineamientos generales y contenidos mínimos de un Plan de gestión de residuos a nivel nacional para cada estado miembro.

En cuanto a la aplicación de las determinaciones de la normativa comunitaria relativa a los RCD conviene destacar dos normas:

- el Reglamento (CE) N° 1013/2006 relativo al traslado de residuos (que sustituye al Reglamento N° 259/93 a partir del 12 de julio de 2.007) que excluye la exportación de ciertos RCD desde la Comunidad con destino a la valorización a países no sujetos a la Decisión de la OCDE (artículo 36).
- la Decisión 2000/532/CE (CE, 2000) mediante la que se aprueba la Lista Europea de Residuos (LER), que recoge en su capítulo 17 los residuos que se consideran de la construcción y demolición (incluida la tierra excavada de zonas contaminadas). Los residuos de la construcción y demolición objeto del análisis de este apartado se clasifican en el capítulo 17 “Residuos de la construcción y demolición” de la Lista Europea de Residuos y se mencionan a continuación:

17 01 00 Hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos:

17 02 00 Madera, vidrio y plástico.

17 03 00 Mezclas bituminosas, alquitrán de hulla y otros productos alquitranados.

17 04 00 Metales (incluidas sus aleaciones).

17 05 00 Tierra (incluida la excavación de zonas contaminadas), piedras y lodos de drenaje.

17 06 00 Materiales de aislamiento y materiales de construcción que contienen amianto.

17 08 00 Materiales de construcción a partir de yeso.

17 09 00 Otros residuos de construcción y demolición.

### 1.3.1.1. España

En el ámbito español la normativa ha ido surgiendo, en general, de la transposición de la europea. La Tabla 1.7 indica la normativa relativa a residuos y RCD, de las cuales se comentan los aspectos de interés a los RCD.

**Tabla 1.7** Legislación española sobre residuos sólidos y RCD

- Ley 10/1998, de Residuos, que transpone la Directiva 91/156/CEE donde se define lo que se considera residuo urbano y se regulan las competencias en materia de recogida y tratamiento de los mismos (derogada por Ley 22/2011)
- Real Decreto 1481/2001, incorpora al derecho interno la Directiva 1999/31/CE
- Orden MARM/304/2002 por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos.
- Real Decreto 105/2008, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición (MPR, 2008)
- Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015 (MARM, 2008).
- Ley 22/2011, de residuos y suelos contaminados, y Real Decreto Real Decreto modificador ley 17/2012. Transpone la Directiva 2008/98/CE (MPR, 2011)

La Ley 10/1998 de Residuos es el punto de referencia legal relacionado con la gestión de los RCD, atribuyendo las siguientes competencias:

- RCD procedentes de obras menores/repación domiciliaria compete a entidades locales

- RCD NO procedentes de obras menores/reparación domiciliaria compete al poseedor

Para los RCD cuyo destino sea el vertedero, la normativa de aplicación es el Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. Se definen en este Real Decreto tres clases de vertederos, tal como en la Directiva 1999/31/CE. Se incorporan todos los requisitos generales para cada clase y se establecen las características que deben tener en cuanto a la formación de las barreras de protección mínimas bajo la masa de residuos. En cuanto a los costos del vertido de residuos este Real Decreto establece que el precio debe cubrir al menos los costos de establecimiento y explotación, garantías, clausura y posterior mantenimiento durante el plazo que se fije, que no podrá ser menor a 30 años.

La Decisión comunitaria 2003/33/CE (CE, 2003), por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos, entró en vigor, sin necesidad de transposición al ordenamiento jurídico español, el 16 de julio de 2004, momento desde el que es de aplicación el procedimiento de admisión de residuos en los vertederos.

En el año 2008 se aprobó el Real Decreto 105/2008 (MPR, 2008), por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición, que combina tres principios fundamentales:

- responsabilidad del productor
- prevención de residuos, y
- corresponsabilidad entre todos los agentes que intervienen en la cadena de producción y gestión de los RCD (promotor, proyectista, dirección facultativa, constructor, gestor)

Este Real Decreto no establece objetivos cuantitativos de prevención, reciclado o vertido de RCD.

Posteriormente, en España se ha aprobado el II Plan Nacional Integral de Residuos - PNIR (2008-2015) (MARM, 2008), que propone los siguientes objetivos:

*Cualitativos:*

- Inclusión en los proyectos de obra de un estudio de gestión de RCD.
- Separación en origen de los RCD peligrosos generados en obra y gestión de acuerdo a la legislación de residuos.
- Separación en planta de tratamiento de los residuos peligrosos contenidos en los RCD recibidos y gestión de acuerdo a la legislación de residuos
- Separación de los RCD en obra, por materiales, a partir de los umbrales establecidos en el Real Decreto 105/2008.
- Cumplimiento del artículo 13 del RD 105/2008, en cuanto a la utilización (valorización) de residuos inertes procedentes de actividades de construcción y demolición en la restauración de espacios degradados, en obras de acondicionamiento o relleno.
- Erradicación del vertido incontrolado de RCD.
- Tratamiento de los RCD por gestor autorizado en los términos establecidos en la legislación.

*Cuantitativos*

Estos objetivos se han propuesto como nuevos, ya que previo a la aprobación del RD 105/2008 y la Directiva 2008/98/CE, para algún año del período 2008-2015, se han establecido

los que derivan de la aplicación de los Planes Autonómicos de Comunidades Autónomas como Cantabria, Cataluña, Madrid, País Vasco, Comunidad Valenciana, entre otros. La Tabla 1.8 muestra los objetivos marcados en el PNIR (2008-2015) (MARM, 2008).

**Tabla 1.8** Objetivos cuantitativos marcados por el PNIR (2008-2015)

Objetivo	Año		
	2010	2012	2015
Separación y gestión de forma ambientalmente correcta de los RP procedentes de RCD (en %)	100	100	100
Reciclado de RCD (en %)	15	25	35
% RCD objeto de otras operaciones de valorización, incluidas las operaciones de relleno	10	15	20
Eliminación de RCD en vertedero controlado (en %)	75	60	45

Los objetivos de reciclado y valorización son objetivos a alcanzar y los de eliminación como tope máximo. Para el logro de estos objetivos, el PNIR (MARM, 2008) propone una serie de medidas, entre las que destacan:

- Obligación de incluir en los proyectos de obra un “Estudio de gestión de los RCD”, de acuerdo al contenido demarcado en el RD 105/2008
- Construcción de la infraestructura necesaria para el cumplimiento de estos objetivos
- Adopción de medidas que desalienten al poseedor de los residuos a depositarlos en vertederos. Estas medidas pueden ir vía incremento de precios de admisión de RCD en vertederos
- Inclusión de los aspectos relativos a la gestión de los RCD en las enseñanzas profesionales

Algunas Comunidades Autónomas españolas han aprobado planes propios de gestión de RCD en aplicación de la normativa anteriormente descrita. Como ejemplo, se muestran los objetivos propuestos en el Plan de Gestión Integral de Residuos de Aragón 2009-2015, en la Tabla 1.9.

**Tabla 1.9** Objetivos marcados por el Plan Integral de Residuos de Aragón

Objetivo	2012	2015	Observación
Reducción de la generación	≥5%	≥6%	En peso respecto a lo generado en 2008
Reutilización y reciclaje	≥50%	≥60%	En peso respecto al total generado en 2008
Recogida controlada y correcta gestión	≥80%	100%	Respecto a toneladas generadas y/o gestionadas en Aragón
Separación de RP y correcta gestión	≥95%	≥98%	En peso respecto a la cantidad total de RP contenidos en los RCD
Control de entradas y salidas de RCD de Aragón	≥95%	100%	Traslados

Un aspecto a destacar es el hecho de que la Comunitat Valenciana dispone de normativa específica en el ámbito de la gestión de los RCD: el Decreto 200/2004, de 1 de octubre, por el que se regula la utilización de residuos inertes adecuados en obras de restauración, acondicionamiento y relleno, o con fines de construcción. Esta norma supone una interesante novedad ya que regula detalladamente la reutilización de los residuos inertes en ciertas obras, sin ser considerada una operación de eliminación.

Como se ha indicado anteriormente, los RCD procedentes de obras menores o reparaciones domiciliarias son competencia de las Entidades Locales (Ayuntamientos). Estos gestionan

también las licencias de obras mayores, que según el RD 105/2008 y el PNIR 2008-2015 (MARM, 2008), requieren de un “Estudio de gestión de RCD”. Por todo ello, han empezado a desarrollar legislación de carácter local, donde se regula:

- las operaciones de gestión de los RCD generados en obras menores, y
- el procedimiento para la adjudicación de las licencias municipales de obras.

Como ejemplo, la Figura 1.5 muestra un posible esquema genérico de la gestión documental de los RCD, donde se observa la interrelación entre los diferentes agentes.

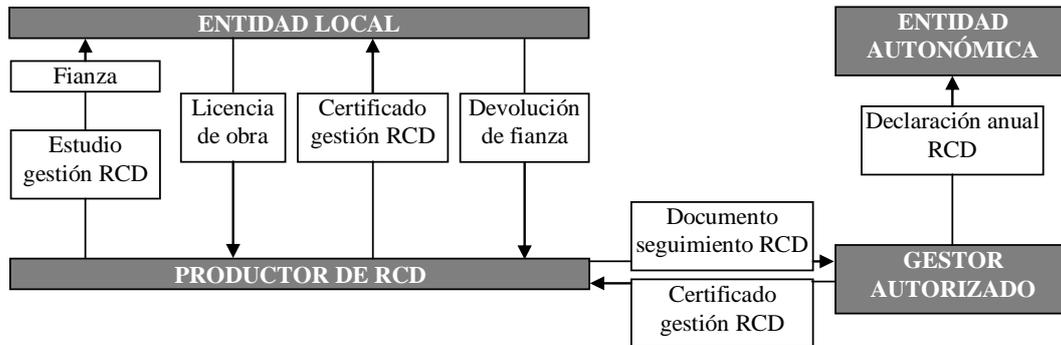


Figura 1.5. Esquema de gestión documental

### 1.3.2. Estados Unidos de Norteamérica

Los residuos de Construcción y Demolición están clasificados en la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA Recovery and Conservation Resource Act) de EE. UU. dentro del Subtitle D, constituyendo un sub-grupo dentro de la clasificación de no-peligrosos.

En particular, los vertederos de RCD no están sujetos a diseños federales ni a criterios de operación. No obstante, si los residuos RCD son llevados a vertederos de residuos sólidos municipales o a vertederos que aceptan residuos peligrosos de pequeños generadores condicionalmente exceptuados (CESQGs), aquellos vertederos deberán cumplir con las regulaciones federales bajo la RCRA, Subtitle D. (Part 258 for MSWLFs and Part 257, Subpart B for CESQG), que contiene normativa sobre monitoreo de agua subterránea y restricciones de localización.

Cada estado ha regulado individualmente respecto a la disposición final de los RCD y con grandes diferencias. Algunos requieren vertederos con impermeabilización, otros con sistema de colección de lixiviados, otros ambas condiciones y algunos ninguna.

### 1.3.3. Países de América Latina

En América Latina sólo dos países han avanzado en la normativa sobre la gestión de RCD, México y Brasil. El resto sólo posee legislación parcial sobre algunos aspectos de la gestión y además las normativas tienen en su mayoría alcance local. Por este motivo, se hará referencia a los mencionados como más avanzados, y al estado actual en Argentina y Chile.

#### 1.3.3.1. Argentina

En Argentina no existe legislación específica sobre las distintas etapas de gestión de los RCD. La Ley Nacional N° 25.612/2002 “Presupuestos mínimos de protección ambiental sobre gestión integral de residuos de origen industrial y de actividades de servicios” define residuo industrial como “cualquier elemento, sustancia u objeto en estado sólido, semisólido, líquido o gaseoso, obtenido como resultado de un proceso industrial, por la realización de una actividad de servicio, o por estar relacionado directa o indirectamente con la actividad, incluyendo

eventuales emergencias o accidentes, del cual su poseedor productor o generador no pueda utilizarlo, se desprenda o tenga la obligación legal de hacerlo”. Aún no ha sido reglamentada y por tanto no es de aplicación. La actividad de la construcción está incluida en el borrador de su decreto reglamentario: “Residuos de la construcción y demolición, incluyendo carreteras: hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos, maderas, vidrios, plástico, metales, hierro, acero, cables”. Esta sería la primera mención específica respecto a los RCD. Cabe señalar que se trata de una norma de base, umbral, de piso, común, sobre la cual se va a construir el edificio total normativo de la problemática de los residuos industriales en la Argentina, de organización federal.

La fracción de residuos peligrosos que pueden encontrarse en los residuos RCD, tales como asbestos, pinturas a base de plomo y envases, solventes y madera tratada deben encuadrarse en la Ley Nacional N° 24051/92 sobre Residuos Peligrosos. Las provincias adhieren a esta ley.

En cada provincia los municipios han dictado Ordenanzas específicas respecto a prohibición de vertido de escombros sobre la vía pública. Excepcionalmente algunos municipios están exigiendo el transporte a través de gestores inscriptos en un registro a tal fin, y los propietarios de las obras deben presentar para obtener la licencia, un plan de gestión de residuos de la obra que se trate.

### **1.3.3.2. Brasil**

Brasil es el primer país en América Latina donde se instala una planta de reciclaje de residuos de la construcción y demolición a partir de la Resolución emitida por CONAMA N° 307/2002 (CONAMA, 2002) que entra en vigencia en el año 2003, y establece directrices, criterios y procedimientos para la gestión de los residuos de la Construcción Civil (RCC). Algunos municipios vienen implantando acciones para el reciclaje, pautadas en la legislación municipal adecuada, como es el caso de Salvador, Belo Horizonte, Sao Paulo, entre otros.

Dicha Resolución clasifica los residuos en 4 clases:

I - Clase A - son los residuos reutilizables o reciclables como agregados, tales como:

- de construcción, demolición, reformas e reparación de pavimentación, de otras obras de infraestructura, inclusive suelos provenientes de terraplenes.
- de construcción, demolición, reformas e reparación de edificaciones: componentes cerámicos (tejas, ladrillos, placas de revestimiento), mortero y concreto;
- de proceso de fabricación y/o demolición de premoldeados de hormigón (bloques, tubos)

II - Clase B - son los residuos reciclables para otros destinos, tales como: plásticos, papel/cartón, metales, vidrios, maderas y otros.

III - Clase C – son los residuos para los cuales no han sido desarrolladas tecnologías o aplicaciones económicamente viables que permitan su reciclaje/recuperación, tales como los productos de yeso.

IV - Clase D – son los residuos peligrosos originados de procesos de construcción, tales como: tintas, solventes, óleos y otros, o aquellos contaminados que provienen de demoliciones, reformas de clínicas radiológicas, instalaciones industriales y otros.

La misma Resolución determina que los generadores de los RCC deberán tener como objetivo principal la prevención en la generación de residuos, y secundariamente la reducción, reutilización y el reciclaje.

Define a los generadores de los RCC como los responsables de los impactos causados al medio natural, estableciendo el principio contaminador-pagador. Los transportistas de RCC son solidariamente responsables en caso de disposición clandestina.

Dentro de las acciones a seguir se considera la participación conjunta de los generadores y la administración pública por medio del Plan Integrado de Gerenciamiento de RCC (PIGRCC). La Tabla 1.10 resume las directrices, criterios y procedimientos fundamentales para la gestión diferenciada de los RCC y la Tabla 1.11 los plazos establecidos para su cumplimiento.

**Tabla 1.10** Criterios y procedimientos para la gestión diferenciada de los RCC.

Responsable	Directrices, criterios, procedimientos
Administración Pública	Elaborar, implementar y coordinar el programa Municipal de RCC. (PMGRCC) para los pequeños generadores. Localizar áreas p/ recepción y almacenamiento temporario de pequeños volúmenes. Prohibir la disposición de RCC en áreas sin licencia. Definir criterios para el registro de transportistas. Incentivar la reutilización y reciclaje en el ciclo productivo. Orientar y controlar a los agentes involucrados. Realizar acciones educativas p/ minimizar la generación e incentivar la segregación.
Generadores de RCC	Elaboras directrices técnicas para los Proyectos de Gerenciamiento de RCC (PGRCC) de grandes generadores. Tener como objetivo principal la no generación de RCC, secundariamente reducción, reutilización, reciclaje y disposición final en áreas específicas, en ese orden. Realizar caracterización de RCC Co-responsabilidad por el destino adecuado de los RCC

*Fuente: Gusmao (2008), modificado*

**Tabla 1.11** Plazos establecidos por la Res. CONAMA 307/2002.

Agente involucrado	Acción	Plazo
Municipio y Distrito Federal	Elaboración del PIGRCC	12 meses (02/01/2004)
Municipio	Implementación del PIGRCC	18 meses (07/07/2004)
Grandes generadores	Inclusión de los PGRCC en proyectos de obra que requieran licencia ambiental	24 meses (02/01/2005)

*Fuente:Gusmao (2008), modificado*

Los municipios deben resolver algunos puntos importantes para cumplir la Resolución, entre ellos la definición entre pequeño y gran generador, la implementación de una política de incentivos para el reciclaje y la promoción de instalaciones para tratamiento y disposición final con creación de consorcios para municipios pequeños.

Estos criterios han sido reglamentados a través de leyes municipales, como ej. Ley N° 11.176/2007 del municipio de João Pessoa y Ley N° 17072/2005 del municipio de Recife. Además de la normativa de alcance nacional se han elaborado algunas normas técnicas para establecer los requisitos básicos de utilización de agregados reciclados que se mencionan en la Tabla 1.12.

**Tabla 1.12** Normas Técnicas relativas a RCC

Norma	Título
NBR 15.112/04	RCC y residuos voluminosos. Áreas de transferencia y triaje. Directrices para proyecto, implantación y operación
NBR 15.113/04	Residuos sólidos de la CC y residuos inertes. Vertederos. Directrices para proyecto, implantación y operación
NBR 15.114/04	Residuos sólidos de la CC. Áreas de reciclaje. Directrices para proyecto, implantación y operación
NBR 15.115/04	Agregados reciclados de Residuos sólidos de la CC. Ejecución de base de pavimentos. Procedimientos
NBR 15.116/04	Agregados reciclados de Residuos sólidos de la CC. Utilización en pavimentos y preparación de hormigones sin función estructural

Fuente: Gusmao (2008), modificado

### 1.3.3.3. México

En México, la Ley General para la prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) (2003 y modificada 2007) (SMA, 2003), en su Título III clasifica a los RCD dentro de los residuos de manejo especial, punto VII: Residuos de la construcción, mantenimiento y demolición en general. En la misma Ley se establece que estos residuos pasan a ser de competencia estatal.

En la gaceta oficial (22/04/2003) se publica la Ley de Residuos Sólidos para el Distrito Federal que regula las disposiciones de la LGPGIR de alcance nacional (SMA, 2003). Esta Ley regula los residuos considerados como no peligrosos. El Art. 26 tiene una gran connotación en la industria de la construcción, enuncia que los propietarios, directores, responsables de obras, contratistas y encargados de inmuebles en construcción o demolición, son responsables solidarios por la gestión de sus residuos y establece la obligación de planes de manejo.

El Distrito Federal es el primero en gestionar normas que regulen el vertido de los RCD, a través de la Norma ambiental (NADF-007-RNAT-2004) del 12/07/2006 (SMA, 2006), que establece la clasificación y especificaciones de manejo de residuos de la construcción para optimizar su control, fomentar su aprovechamiento y minimizar su depósito final.

Define a los RCD como los materiales, productos o subproductos generados durante las actividades de excavación, demolición, ampliación, remodelación, modificación o construcción tanto pública como privada. Los clasifica de acuerdo a la Tabla 1.13.

**Tabla 1.13** Clasificación de RCD en la normativa del Distrito Federal

A. Residuos potencialmente reciclables (agregados y material de relleno)	B. Residuos de excavación	C. Residuos sólidos
1. Prefabricados de mortero o concreto 2. Concreto simple 3. Concreto armado 4. Cerámicos 5. Concretos asfálticos 6. Concreto asfáltico producto del fresado 7. Productos de mampostería 8. Prefabricados de arcilla (ladrillos) 9. Blocks 10. Mortero	1. Suelo orgánico. 2. Suelos no contaminados y materiales arcillosos, granulares y pétreos naturales contenidos en ellos. 3. Otros materiales minerales no contaminados y no peligrosos contenidos en el suelo.	1. Cartón. 2. Metales. 3. Papel. 4. Madera. 5. Plástico. 6. Residuos de podas, tala y jardinería 7. Paneles de yeso. 8. Vidrio. 9. Otros.

Los generadores son categorizados de acuerdo a lo consignado en la Tabla 1.14.

**Tabla 1.14** Categoría y requerimientos de los generadores de RCD

Categoría	Requerimientos
Mayor o igual a 7 m <sup>3</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presentación de plan de manejo de residuos de acuerdo a lo establecido por las disposiciones jurídicas aplicables.</li> </ul>
Menor de 7 m <sup>3</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recolección mediante la contratación de un prestador de servicios (transportista) o la Delegación correspondiente.</li> <li>• Sin presentación de plan de manejo de residuos.</li> </ul>

*Fuente (SMA, 2006)*

Contiene además especificaciones técnicas y objetivos:

*Cualitativos:*

- segregación en origen según la clasificación de la Tabla 1.13 en A, B y C.
- separación y tratamiento según la legislación para los residuos peligrosos.
- condiciones de recolección, transporte y almacenamiento.
- para los residuos identificados como residuos sólidos en la sección C, el generador debe buscar su valorización preferentemente.

*Cuantitativos:*

- los generadores deben enviar a reciclaje por lo menos un 30% de los residuos de la construcción Tipo A, durante el primer año de aplicación de la norma ambiental, incrementándose dicho porcentaje en un 15 % anual hasta llegar al 100 % como óptimo.
- Los generadores deben reusar directamente en el sitio de generación al menos el 10 % los residuos generados Tipo B, salvo algunas excepciones.
- en las siguientes obras, entre otras, se debe sustituir al menos un 25% de los materiales vírgenes por materiales reciclados: sub-base en caminos y estacionamientos; carpetas asfálticas para vialidades secundarias; construcción de terraplenes; cubierta en relleno sanitario; rellenos y pedraplenes.

La Coordinación Sectorial de Normas, Especificaciones y Precios Unitarios de la Secretaría de Obras del Gobierno del D. F. ya elaboró la Norma 4.01.01.029, referente a Materiales de Construcción reciclados.

#### **1.3.3.4. Chile**

Chile cuenta con una Política de Gestión Integral de residuos sólidos aprobada por el Consejo Directivo de CONAMA en 2005 (Comisión Nacional de Medio Ambiente) (CONAMA, 2005). En este documento la misma CONAMA expresa la necesidad de contar con una Ley General de Residuos, ya que el vacío legal existente genera descoordinación en el manejo de los mismos, tanto en los domiciliarios como no-domiciliarios. Los residuos peligrosos se encuentran regulados con el Reglamento Sanitario de Manejo de Residuos Peligrosos, D.S. N° 148/04.

Con relación al manejo de los RCD no se cuenta con reglamentos específicos. Un antecedente interesante es que en 1998 se creó un proyecto denominado Acuerdo de Producción Limpia (APL), que se aplicara a las diferentes áreas productivas del país. Este acuerdo entró en vigencia en el año 2000. Del un total de 51 empresas que participaron, solo un 3% correspondía a empresas constructoras. Con este acuerdo se logró avanzar en el control de los residuos de la construcción desde 0% a 50%. Este acuerdo se mantuvo activo en la región Metropolitana hasta el año 2005. Programas de minimización de residuos, de reciclaje, adecuación en sistemas de trabajo, mejoras e innovaciones tecnológicas para aprovechar la luz natural o hacer un uso

adecuado del agua o de las materias primas, son algunas de las iniciativas que las empresas han desarrollado a través de los Acuerdos de Producción Limpia (APL).

Para solucionar el problema de los RCD, junto con el APL se creó una empresa por medio de la Cámara Chilena de la Construcción y el gobierno llamada REGEMAC aún vigente. Este es un proyecto que propone utilizar los residuos sólidos para rellenar los pozos de áridos en recuperación, con el objeto de poder reutilizar posteriormente esos sitios para futuros proyectos.

#### 1.4. Elementos de la gestión integral de los RCD

En el apartado 1.1 se definió el concepto de gestión integral de residuos, y en este apartado lo aplicaremos al manejo de los RCD, describiendo el conjunto de actividades e instalaciones más comunes que componen el sistema. En el caso de los RCD, se pueden considerar dos fases: interna (o intraedificacional si son obras edilicias) y externa, considerando para la primera la etapa de recogida, y para la segunda las etapas de transporte, tratamiento y disposición final (Figura 1.6). Así, para un mismo sistema de gestión integral pueden plantearse distintas combinaciones de sus etapas, donde cada combinación constituye un escenario y algunas pueden no estar incluidas dependiendo de las características propias de la región de que se trate.

Un aspecto a tener en cuenta en la planificación de la gestión interna es el tamaño y la importancia de la obra civil de que se trate. Esto es debido a que las obras de pequeña envergadura, denominadas “obra menor” en la mayoría de las legislaciones, no tendrán el mismo tratamiento respecto a la gestión de sus residuos, ya que el generador es eximido de la responsabilidad en la gestión, y la autoridad de gobierno correspondiente la toma a su cargo a través de programas de alcance local. En este caso, el límite suele estar entre 1 m<sup>3</sup> y 2 m<sup>3</sup> según la normativa y se gestionan a través de ecopuntos, sitios donde los generadores menores llevan sus RCD para luego ser transportados a plantas de tratamiento por la autoridad local. En otros casos, son recogidos por la autoridad local puerta a puerta y son tratados junto a los residuos domiciliarios.

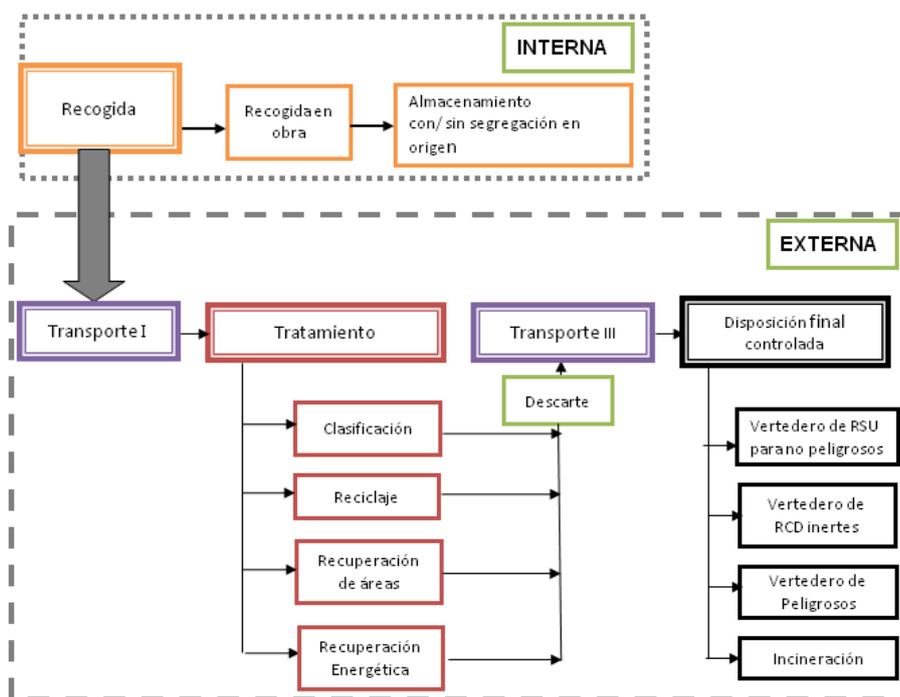


Figura 1.6. Etapas de gestión de los RCD.

Fuente: Elaboración propia

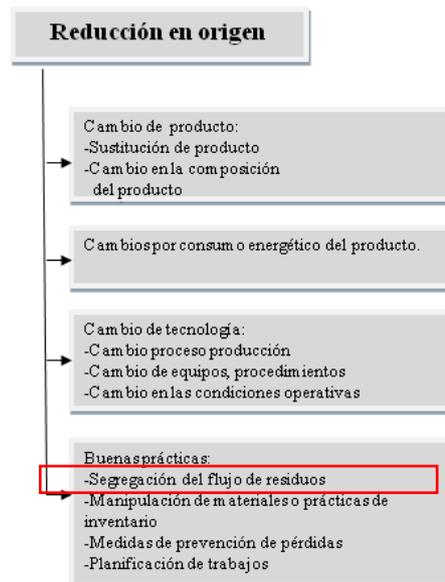
Así mismo, cabe señalar que la clasificación puede formar parte de los tratamientos mecanizados o realizarse en obra. En este último caso formaría parte de la gestión interna. En la Figura 1.6 se ha supuesto que los residuos se recogen mezclados y se transportan a una planta de clasificación para la separación de las distintas fracciones.

### 1.4.1. Recogida

La etapa de Recogida comprende las operaciones de recolección en obra y almacenamiento transitorio de los RCD en la obra civil. Es un elemento clave en la gestión integral de los residuos. Tal afirmación se sustenta en que, de la forma en que se recogen y separan los residuos dependerá la factibilidad de las opciones de manejo siguientes, tales como la clasificación y valorización. El tipo de recogida, selectiva o no-selectiva influyen significativamente sobre la calidad de los materiales recuperados y su posibilidad de reciclaje. En este sentido, los mercados son un determinante, puesto que condicionan cómo deben separarse los materiales residuales para que puedan ser aprovechados.

Otro aspecto importante es que en la etapa de recogida de los RCD se establece la relación generador-recolector (Mc Dougall *et al.*, 2004a). Desde el punto de vista del generador, lo más sencillo, en términos de tiempo y espacio, es realizar la recogida mezclada. Sin embargo, sus esfuerzos deben ser acordes con la forma en que el recolector necesita recibirlos en coincidencia con los métodos de tratamiento planeados y con la legislación vigente. De otro modo, se desequilibra el sistema de gestión integral y se actúa sin cumplir los requisitos legales.

Varios países han establecido como medida obligatoria la separación de RCD en origen (tal como se referiría en el punto 1.3 en el marco normativo), y la elaboración de un plan de gestión de RCD en obra que incluye la planificación de la recogida selectiva. La elaboración de este plan, como parte de los proyectos ejecutivos de construcción/demolición, permite la prevención en origen a través de la implementación de medidas de minimización (Figura 1.7), la planificación óptima del movimiento de RCD dentro de la obra, la identificación de gestores externos y la determinación de costos de gestión. Este plan es un requisito a cumplir en las legislaciones de varios países.



**Figura 1.7.** Prácticas de minimización de residuos.

Fuente: Begum *et al.* (2007), modificado

En la misma Figura 1.7 se indican otras estrategias de minimización de RCD a aplicarse, inclusive desde el diseño de las obras civiles.

Por otra parte, es importante señalar que diversas investigaciones han reportado ventajas en cuanto a la recogida selectiva vinculadas a competitividad empresarial, gestión eficiente de recursos, minimización en la generación de residuos, cumplimiento de requisitos normativos, optimización de costos y seguridad laboral. Puede analizarse estos aspectos en ITEC (2000) y Martínez Bertrand (2008) en España, Esin y Cosgun (2007) en Turquía, Pinto (2005), Viana (2009) y Medeiros (2009) en Brasil, Begum *et al.*, (2007) en Malasia, Mercante (2008) y Mercante *et al.*, (2010) en Argentina.

#### **1.4.2. Transporte**

Se incluye aquí el transporte de los RCD cualquiera sea el tramo de que se trate. Como puede verse en la Figura 1.6, hay dos etapas de transporte I y III, siendo el primero desde la obra civil hasta las instalaciones de tratamiento y el segundo traslada las fracciones de rechazo desde dichas plantas hasta los sitios de disposición final. Igualmente podrían existir otros tramos intermedios. Esta etapa puede tener un peso muy importante en cuanto a las cargas ambientales y costos dentro del sistema de gestión, todo dependerá de las distancias a recorrer.

En el caso de los RCD las operaciones de recogida y transporte son ejecutados muy frecuentemente por empresas privadas, por lo tanto sus itinerarios están determinados por ellos mismos, pero de acuerdo a las rutas de carga que le indique la administración gubernamental.

El traslado de los RCD se realiza en contenedores individuales o en camiones de distinto tonelaje. Los primeros cuentan, en general, con capacidades de entre 1 m<sup>3</sup> y 8 m<sup>3</sup> para las fracciones residuales de mixtos, inertes, metales, yeso y otros materiales pesados; y de entre 20 m<sup>3</sup> y 30 m<sup>3</sup> para los residuos de la fracción liviana (papel-cartón, plástico, madera). Los camiones tienen distintas capacidades según la cantidad de ejes del vehículo.

#### **1.4.3. Instalaciones de tratamiento**

El tratamiento de los flujos de RCD con fines de valorización para su transformación en nuevos productos o energía constituye un proceso que requiere el uso de maquinaria especializada y de procesos industriales que garanticen la calidad de los materiales según las normativas de cada región. Se necesita, por lo tanto, maquinaria capaz de realizar la compleja clasificación de materiales inertes y no especiales de distinta naturaleza (inertes, papel-cartón, plásticos, metales, madera), la trituración de los componentes inertes de hormigón, cerámicos u otros y su posterior cribado, a los fines de introducirlos en el mercado de materiales de construcción.

En las normativas implementadas recientemente en España (PRM, 2008) y otros países, se ha establecido la figura del gestor de RCD, empresario o empresa que ejerce las operaciones de almacenamiento en planta de tratamiento, selección, reciclaje y eliminación, orientadas a dar a los residuos producidos el destino más adecuado desde el punto de vista medioambiental. Por otra parte, las actividades de valorización y eliminación están sujetas a autorización medioambiental previa y a controles por parte de la administración pública. Así la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) ha dictado una norma que regula los centros de eliminación y de valoración de los residuos inertes de derribo y demás residuos de la construcción (AENOR, 1999), como también en Brasil se ha dictado una norma para áreas de

reciclaje, directrices de proyecto, implantación y operación (ABNT, 2004), por mencionar algunas.

En lo que sigue se describen las plantas de clasificación y las plantas que tratan (trituration y cribado) inertes, específicas del sistema de gestión de RCD. Algunas cuentan además con un área de trituración para la fracción residual de madera de construcción. Las instalaciones de procesamiento para el resto de las fracciones no se detallan por ser plantas que reciben flujos residuales de diversos procesos industriales e incluso del flujo de residuos domiciliarios. La investigación sobre la operación detallada de las mismas excede los límites de esta investigación.

Seguidamente será tratada la recuperación de áreas como una forma de recuperación material de los RCD, actividad que concierne particularmente de este flujo de residuos.

Con relación a las instalaciones de valorización energética de los RCD, de las fracciones con alto poder calorífico existentes en los mismos sólo se justifica abordarla en el caso de la fracción madera, debido a que en algunas composiciones, tal como se señaló en el apartado 1.2.2 cobra real importancia su porcentaje relativo (40% en el caso ejemplificado).

En cuanto al resto de las fracciones no se abordarán los procesos de valorización energética por tener una participación minoritaria en los RCD (cartón-papel, plásticos), y por lo tanto quedan fuera de los límites de esta tesis.

#### **1.4.3.1. Plantas de clasificación de RCD y reproceso de inertes**

La clasificación del RCD en plantas consiste en la separación por métodos mecánicos o manuales de las distintas fracciones que lo componen, y por lo tanto, solo es necesaria en el caso de la recogida no-selectiva. Se realiza en instalaciones especialmente diseñadas y funcionan además como plantas de transferencia, en cuanto al depósito temporal de RCD que han de ser tratados o eliminados en instalaciones localizadas a grandes distancias, tales como papel, maderas, vidrios, metales.

Por otra parte, cabe señalar que en la gestión de los RCD mixto se debe tratar de minimizar el costo del transporte, por tratarse de residuos de elevada densidad, gran volumen y escaso valor económico, al que se suma el sobrecoste por el tratamiento. Por esta causa, las plantas de clasificación funcionan junto a las plantas de reproceso de inertes, incluso con procesos de clasificación y trituración de inertes alternados a lo largo de la línea de producción.

Se han desarrollado instalaciones de clasificación y reproceso de inertes de distintos niveles de complejidad y tecnología: 1, 2 y 3 (Aneiros, 2008) dependiendo de las operaciones unitarias incluidas en el proceso. No obstante esta clasificación, suelen encontrarse plantas que no se ajustan exactamente a algún tipo de los mencionados, pues cada diseño es particular al sitio de que se trate y a sus propias necesidades locales. A su vez estas plantas pueden ser fijas, semi-móviles o móviles en función de las características de heterogeneidad de los residuos a tratar. En esta tesis se realiza la siguiente caracterización para cada nivel:

- Las de primer nivel se consideran aquellas que se componen de trituradoras móviles y equipo de cribado. Procesan materiales inertes, ya que no tienen capacidad de clasificación. Cuentan solamente con clasificador de metales por imanes.
- Las de nivel 2 cuentan con electroimán para la separación de metales y con planta de trituración fija; poseen mayor cantidad de cribas que las anteriores y suelen contar con separación manual de las fracciones livianas a lo largo del proceso de clasificación por tamaños.

- Las de nivel 3 cuentan con cabinas de separación manual, sistemas de aspersión de materiales livianos y separación en húmedo, y están preparadas para separar distintas fracciones de RCD mezclados en forma mecánica. La trituración del RCD inerte se lleva a cabo en plantas fijas y/o con trituradoras móviles.

#### **1.4.3.2. Planta de reproceso de madera**

El reproceso de la madera consiste en la trituración de los residuos de madera de construcción a tamaños acordes con su posterior utilización. Las instalaciones constan de una tolva, trituradora, cintas de transporte hacia las cribas de clasificación y electroimán para separar restos de metales.

Puede tratarse de su aprovechamiento para la fabricación de placas aglomeradas, su uso como enmienda de suelo en jardines o su valorización energética como combustible en calderas. Se trituran residuos de madera como tablonos o pallets, con las restricciones que se mencionaron en el apartado 1.2.4.2 respecto de la madera tratada.

#### **1.4.3.3. Instalaciones de recuperación de áreas degradadas**

Las instalaciones de recuperación de áreas son en sus aspectos técnicos iguales que los vertederos de RCD, siendo la diferencia una cuestión conceptual en cuanto a la utilización del suelo se refiere. El objetivo de disponer RCD en estos sitios es rehabilitar los terrenos alterados corrigiendo los impactos ocasionados por la explotación y dando a los terrenos un uso, el mismo o distinto del que tuvieron originalmente,

Fundamentalmente se requiere de una caseta de recepción y báscula, una máquina compactadora y en algunos casos una trituradora para RCD de gran tamaño, dependiendo esto de la regulación específica para el sitio que haya determinado los RCD admisibles.

Las características técnicas se referirán en el apartado 1.4.4.

#### **1.4.3.4. Instalaciones de valorización energética de la madera**

Las instalaciones de valorización energética de la madera residual, utilizada como combustible, no son en sí mismas una planta de tratamiento, sino que a partir de la necesidad de generar energía para otros procesos se incluye al residuo como un sustituto del combustible original. Cabe señalar que ha habido una preocupación por la madera de construcción tratada con conservantes químicos tóxicos cuando se la utiliza como fuente de energía alternativa, debido a las emisiones al aire y las concentraciones de los metales en la ceniza. En este sentido, regulaciones de la EPA requieren el uso de las mejores tecnologías de control disponibles para reducir al mínimo las emisiones al aire de estas instalaciones (EPA 2006b).

En cuanto a las cenizas producidas por la combustión de RCD de madera, para generación de electricidad, se ha encontrado que la madera tratada con CCA aumenta las concentraciones de arsénico y cromo en la ceniza, y por consiguiente en el lixiviado (Iida *et al.*, 2004; Jambeck *et al.*, 2007). Las cenizas de madera pueden ser caracterizadas como residuo peligroso si el 5% del combustible de madera ha sido tratado con CCA (Solo-Gabriele *et al.*, 2002).

Todas estas consideraciones hacen ver que, si bien existe la posibilidad de recuperar energía de los residuos de madera de RCD, su práctica debe ser muy controlada, y por lo tanto, las regulaciones son necesarias.

#### 1.4.4. Disposición final

Los vertederos son instalaciones para la eliminación de los RCD de forma controlada, que van a estar depositados por un periodo mínimo determinado por la legislación, que es de un año, por ejemplo, en el caso de la Directiva Comunitaria Europea (CE, 1999). En la citada normativa estos sitios se clasifican en vertederos de residuos peligrosos, no peligrosos e inertes, se especifican las características técnicas de cada uno y los requisitos mínimos para su ubicación, diseño, construcción, explotación y clausura.

Para el caso de los vertederos de inertes, se listan los residuos admisibles sin realización previa de pruebas y los valores límite de lixiviación y de contenido total de parámetros orgánicos para los residuos admisibles. (CE, 2003).

Hay ciertas características técnicas determinadas por la legislación que deben cumplir estos sitios. Básicamente se refieren a protección inferior, superior, y estabilidad de taludes. La base y los lados del vertedero están determinados por una capa mineral que cumpla unos requisitos de permeabilidad y espesor cuyo efecto combinado en materia de protección del suelo, de las aguas subterráneas y de las aguas superficiales sea por lo menos equivalente al derivado del requisito siguiente: vertederos para residuos inertes:  $k \leq 1,0 \times 10^{-7}$  m/s; espesor  $\geq 1$  m ( $k$  = coeficiente de permeabilidad medido en m/s).

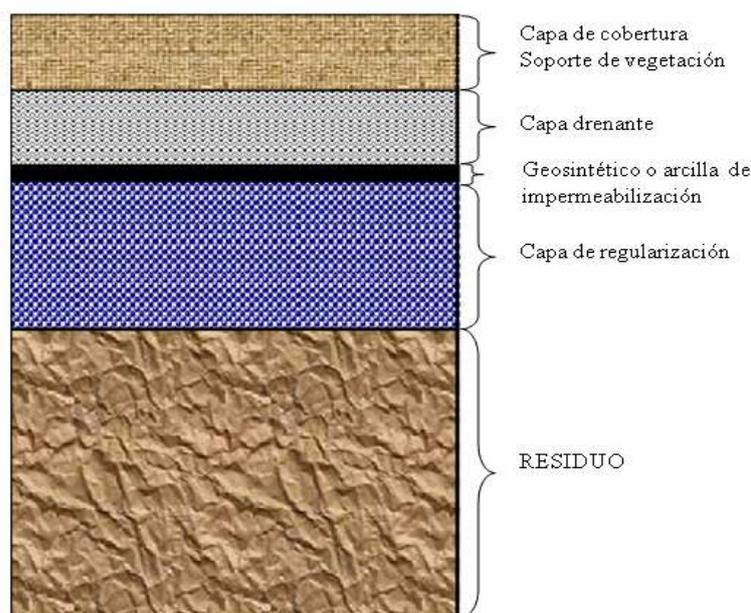
Cuando la barrera geológica natural no cumpla las condiciones antes mencionadas, se puede complementar mediante una barrera geológica artificial, que consiste en una capa mineral de un espesor ( $e$ ) no inferior a 0,5 m. Figura 1.8 ejemplifica las condiciones impuestas por la normativa mencionada.



**Figura 1.8.** Esquema de las barreras impermeabilizantes en vertederos de inertes.

En el caso del cierre del vertedero, se especifica un tipo de cobertura especial que se indica en la Figura 1.9.

Estas especificaciones generales se dan a modo de ejemplo, y las barreras impermeabilizantes deben adaptarse al resultado de un análisis de riesgo que tome en cuenta las condiciones ambientales de la región donde se ubicará el vertedero de que se trate.



**Figura 1.9.** Esquema de las capas de cierre en vertederos de inertes

Los criterios utilizados para la selección de sitios aptos para disposición de RCD inertes, en general, deben incluir aspectos urbanos, ambientales y económicos.

### 1.5. Metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

La metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta que permite evaluar el comportamiento ambiental de un sistema (producto, proceso o actividad) a lo largo de su ciclo de vida (de la cuna a la tumba). Esta metodología ha sido desarrollada por la familia de normas ISO 1404X a partir de 1998 y actualizada en 2006.

El ACV según ISO 14040-44 (ISO, 2006) *“Es un procedimiento objetivo de evaluación de cargas energéticas y ambientales correspondientes a un proceso o a una actividad, que se efectúa identificando los materiales y la energía utilizada y los descartes liberados en el ambiente natural. La evaluación se realiza en el ciclo de vida completo del proceso o actividad, incluyendo la extracción y tratamiento de la materia prima, la fabricación, el transporte, la distribución, el uso, el reciclado, la reutilización y la disposición final.”*

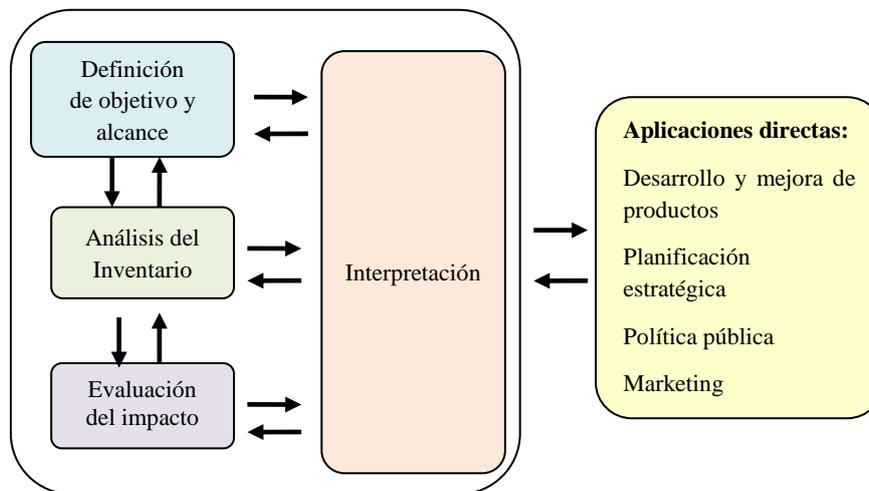
Se considera que el ACV tiene sus orígenes a finales de los sesenta cuando se realizaron diversos estudios para valorar la eficiencia de determinadas fuentes de energía, a causa fundamentalmente de la crisis del petróleo.

En 1969, la compañía Coca-Cola encargó un estudio al Midwest Research Institute (MRI), a menudo referenciado como el que marcó el comienzo de los ACV, en el que debían compararse diferentes tipos de envases para determinar cuál de ellos suponía un menor consumo de recursos y una menor cantidad de emisiones. En 1984, el Laboratorio Federal Suizo para el Ensayo y la Investigación de Materiales (EMPA) publicó un estudio de materiales de envases y embalajes. La exhaustiva base de datos usada en este estudio fue publicada y sirvió para facilitar la posterior realización de numerosos ACV.

Sin embargo, el gran despliegue en el desarrollo metodológico y en la aplicación del ACV se ha dado en los años noventa por el impulso de algunas organizaciones de referencia, que han suministrado tanto guías metodológicas como bases de datos de inventarios del ciclo de vida para diferentes áreas geográficas: USEPA (United State Environmental Protection Agency), la

Oficina Federal Suiza para el Medio Ambiente, Bosques y Paisajes (SAEFL), el centro de Ciencias Ambientales de Leiden (CML), o el Consejo Nórdico. El desarrollo de normas internacionales dentro de ISO a partir del año 1993 también ha contribuido notablemente a la difusión del ACV. Pero no hay duda de que el mayor desarrollo ha venido de la mano de los trabajos de la SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) que publicó en 1993 el primer código de buenas prácticas confeccionado por un grupo de expertos en ACV (Consoli *et al.*, 1993).

La metodología de Análisis de Ciclo de Vida consta de cuatro etapas, según ISO 14040-44 (ISO, 2006): Definición de objetivos y alcance, Inventario del Ciclo de Vida (ICV), Evaluación del impacto ambiental e Interpretación de resultados. La Figura 1.10 indica dichas etapas y la relación entre ellas. Se puede reconocer que se trata de un proceso iterativo, el cual permite incrementar el nivel de detalle en sucesivas iteraciones.



**Figura 1.10.** Esquema de un ACV según la norma ISO 14040-44 (2006)

Desde sus inicios, esta metodología se ha aplicado principalmente a la evaluación del comportamiento ambiental de productos. Sin embargo, dado su potencial, en los últimos años se ha ampliado su campo de aplicación a la evaluación ambiental de servicios, como el de la gestión de residuos (Bovea *et al.*, 2011).

### 1.5.1. Definición de objetivos y alcance

En esta primera etapa se deben establecer y definir los objetivos y el alcance del estudio lo que conlleva a las siguientes fases de acuerdo a la norma 14040-44 (2006).

- *Definición de objetivos.* Consiste en definir el propósito del ACV. Debe incluir cuál es la razón que lleva a realizar un estudio de este tipo y el uso que se pretende dar a los resultados.
- *Definición del alcance.* Define el ámbito de aplicación del estudio, límites del sistema, requerimientos de datos y categorías de datos que se van a utilizar, hipótesis, extensión del estudio. El alcance debe definirse de forma que se asegure que la profundidad del estudio es compatible con los objetivos definidos inicialmente.
- *Definición de la unidad funcional.* La unidad funcional es la unidad de comparación que se utiliza en el ACV e ICV. Es aquella a la que irán referidas todas las entradas y salidas del sistema. Su definición permite realizar una comparación entre varios sistemas que cumplen la misma función.

- *Requisitos de calidad de los datos.* Es necesario establecer las características de los datos necesarios para el estudio. La descripción de la calidad de los datos es importante para comprender la fiabilidad de los resultados del estudio e interpretar correctamente los resultados del estudio.

### 1.5.2. Análisis del Inventario de Ciclo de Vida (ICV)

El análisis del inventario implica la recopilación de los datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas del sistema objeto de estudio, tomando como referencia la unidad funcional. Es la etapa más costosa en cuanto a consumo de recursos y más crítica de cualquier estudio de ACV, ya que de la calidad de los datos de inventario dependerá la calidad de los resultados que se obtengan. Se trata de un proceso iterativo.

Según las normas ISO 14040-44 (2006), la etapa de ICV consiste en contabilizar para cada proceso unitario dentro de los límites del sistema, los datos en forma de entradas (materia y energía) y en forma de salidas (productos, emisiones gaseosas, líquidas y sólidas) siguiendo el diagrama de la Figura 1.11 utilizando las indicaciones del ISO/TR 14048 (2002).



**Figura 1.11.** Esquema de la etapa de inventario del ciclo de vida.

Los datos a incluir en el inventario deben recopilarse para cada proceso unitario involucrado dentro de los límites del sistema. Para ello, se puede recurrir a datos de campo (opción recomendada) o utilizar bases de datos de ICV, públicas o comerciales.

- *Inventario a partir de datos de campo (datos primarios):* Esta es la forma de obtener datos de alta calidad para el estudio de ACV. Con el fin de obtener datos representativos, se suelen recopilar datos de entradas y salidas correspondientes a un período de tiempo de un año, posteriormente se asignan a la unidad funcional y a cada proceso unitario.
- *Bases de datos de inventario del ciclo de vida comerciales (datos secundarios):* A fin de facilitar la elaboración de inventarios y atenuar los recursos necesarios en su obtención, se han constituido diferentes bases de datos públicas, privadas o comerciales, que incorporan los resultados de estudios de inventario del ciclo de vida aplicados a diferentes materiales y procesos, de forma que pueden ser utilizadas como fuente de información de elementos minoritarios en otros inventarios. Algunos ejemplos de bases de datos de inventario desarrolladas más recientemente se muestran en la Tabla 1.15.

**Tabla 1.15.** Ejemplos de bases de datos de inventario del ciclo de vida (Bovea *et. al.*, 2011).

Base de datos	Referencia	País
Ecoinvent	<a href="http://www.ecoinvent.ch/">http://www.ecoinvent.ch/</a>	Suiza
Idemat	<a href="http://www.idemat.nl/">http://www.idemat.nl/</a>	Holanda
Franklin US LCI	<a href="http://www.fal.com/">http://www.fal.com/</a>	EE. UU.
Boustead Model	<a href="http://www.boustead-consulting.co.uk/">http://www.boustead-consulting.co.uk/</a>	Reino Unido
ELCD	<a href="http://lca.jrc.ec.europa.eu/">http://lca.jrc.ec.europa.eu/</a>	Europa
IVAM LCA Data	<a href="http://inetsrv.ivam.uva.nl/">http://inetsrv.ivam.uva.nl/</a>	Holanda
LCA Food Database	<a href="http://www.lcafood.dk/">http://www.lcafood.dk/</a>	Dinamarca

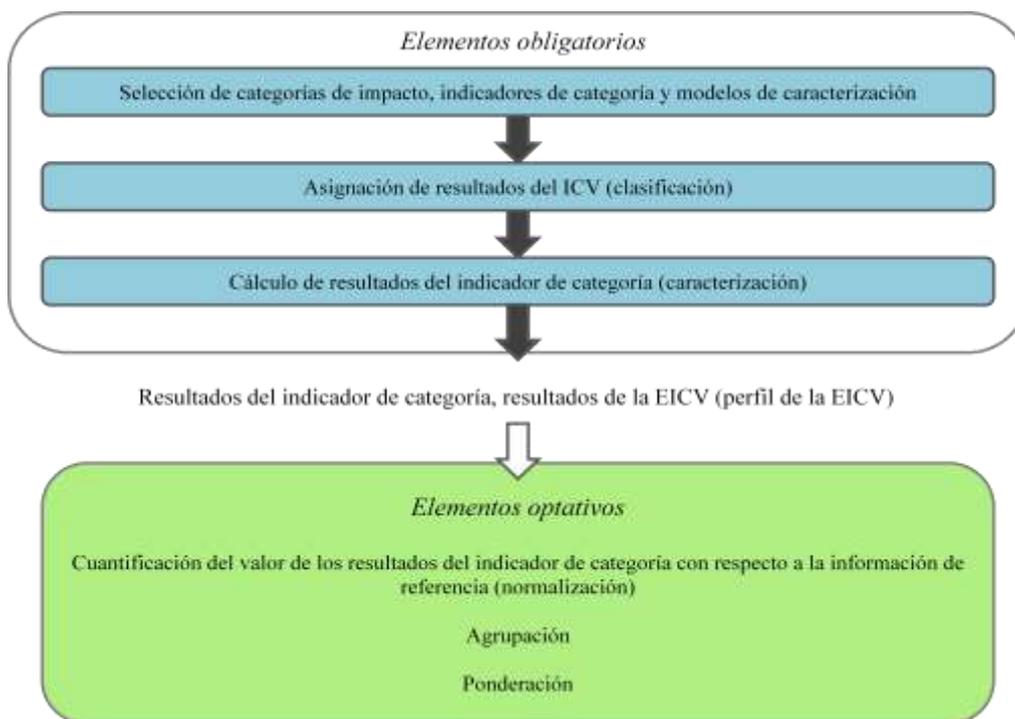
El resultado que se obtiene de la etapa de inventario es la cuantificación de las emisiones al medio ambiente, diferenciando entre emisiones atmosféricas, vertidos al agua y suelos, residuos sólidos y otros aspectos ambientales (ruido, radiactividad, etc.), para el sistema en su conjunto y para cada proceso unitario que lo compone (opcional, dependiendo del objetivo del estudio).

### 1.5.3. Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida (EICV)

La fase de evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) tiene por objeto estimar la importancia de los impactos ambientales utilizando los resultados obtenidos en la etapa de inventario. El objetivo de esta etapa es relacionar los datos de las emisiones cuantificadas en la etapa de inventario con una serie de categorías de impacto definidas previamente, y medir la magnitud relativa de la contribución de cada contaminante a la categoría de impacto correspondiente.

Los resultados de una EICV pueden utilizarse para identificar oportunidades de mejora, caracterizar o comparar variaciones de un sistema de productos en el tiempo, comparar sistemas diferentes de producto, identificar variables medioambientales críticas.

Según la norma ISO 14040-44 (2006), el análisis de impacto puede realizarse a dos niveles, tal y como muestra la Figura 1.12, con elementos obligatorios, que permiten obtener un indicador para cada una de las categorías de impacto; o con elementos opcionales, que permiten obtener un único indicador que engloba toda la información del inventario mediante la aplicación de un método de evaluación del impacto.



**Figura 1.12.** Elementos de la etapa de evaluación del impacto del ciclo de vida

- *Elementos obligatorios: Análisis por categoría de impacto.* En esta fase del EICV se seleccionan las categorías de impacto, los indicadores de categoría y los modelos de caracterización que se van a considerar. A continuación se asignan los resultados del ICV a las categorías de impacto (*clasificación*) y se calculan los resultados de los indicadores para cada una de las categorías de impacto consideradas (*caracterización*). Las categorías que suelen utilizarse en los estudios de ACV son las mostradas en la Tabla 1.16, tomando

como factores de caracterización los propuestos, por ejemplo, por el método CML2000 (Guinée, 2002). Respecto a la categoría uso del suelo, cabe señalar que una de las debilidades en el ACV es que no hay acuerdo científico sobre el método de evaluación, lo que resulta frecuentemente o bien en la exclusión, o en la falta de evaluación de impactos ambientales locales relacionadas con el uso del suelo (Núñez *et. al.*, 2010).

**Tabla 1.16** Categorías de impacto frecuentemente utilizadas en ACV

Categoría de impacto	Unidad
Agotamiento de recursos naturales	kg Sb eq
Calentamiento global	kg CO <sub>2</sub> eq
Destrucción de la capa de ozono	kg CFC-11 eq
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq
Acidificación	kg SO <sub>2</sub> eq
Eutrofización	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq
Toxicidad humana	kg 1,4 diclorobenceno eq
Ecotoxicidad	Kg Zn eq.
Uso del suelo	ha-año

- *Elementos opcionales: Descripción de los métodos de valoración del impacto.* La aplicación de un método de evaluación de impacto permite expresar la carga ambiental del sistema analizado en un único indicador, siguiendo los pasos de:  
*Normalización:* Cálculo de la magnitud de los resultados de indicadores de categoría en relación con la información de referencia.  
*Agrupación:* Organización y posible clasificación de las categorías de impacto.  
*Ponderación:* Conversión y posible suma de los resultados del indicador a través de las categorías de impacto utilizando factores numéricos basados en juicios de valor.  
 De forma simplificada, el proceso seguido hasta obtener un único valor del impacto ambiental pasa por agrupar los resultados conseguidos para cada una de las categorías de impacto, dependiendo del daño o efecto que producen. Este paso es altamente subjetivo, pero necesario si se desea obtener un único indicador, de ahí la existencia de diferentes métodos de evaluación de impacto.

Algunos ejemplos de métodos de evaluación del impacto se muestran en la Tabla 1.17.

**Tabla 1.17** Ejemplos de métodos de evaluación del impacto.

Método	Referencia	Enlace
Eco-Indicator '95	Goedkoop (1995)	<a href="http://www.pre.nl">http://www.pre.nl</a>
Eco-Indicator '99	Goedkoop y Spriensma (2000)	<a href="http://www.pre.nl">http://www.pre.nl</a>
Eco-Scarcity	Frischknecht <i>et al.</i> (2006)	<a href="http://www.esu-services.ch">http://www.esu-services.ch</a>
EDIP 2003	Hauschild y Potting (2004)	<a href="http://ipt.dtu.dk/~mic/Projects.htm#EDIP2003">http://ipt.dtu.dk/~mic/Projects.htm#EDIP2003</a>
IMPACT 2002+	Jolliet <i>et al.</i> (2003)	<a href="http://www.epfl.ch/impact">http://www.epfl.ch/impact</a>
TRACI	Bare <i>et al.</i> (2003)	<a href="http://epa.gov/ORD/NRMRL/std/sab/iam_traci.htm">http://epa.gov/ORD/NRMRL/std/sab/iam_traci.htm</a>
EPS 2000	Steen (1999 <sup>a,b</sup> )	<a href="http://eps.esa.chalmers.se/">http://eps.esa.chalmers.se/</a>
CML 2001	Guinée <i>et al.</i> (2002)	<a href="http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/projects/lca2/lca2.html">http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/projects/lca2/lca2.html</a>
LIME	Itsubo <i>et al.</i> (2004)	<a href="http://www.jemai.or.jp/lcaforum/index.cfm">http://www.jemai.or.jp/lcaforum/index.cfm</a>

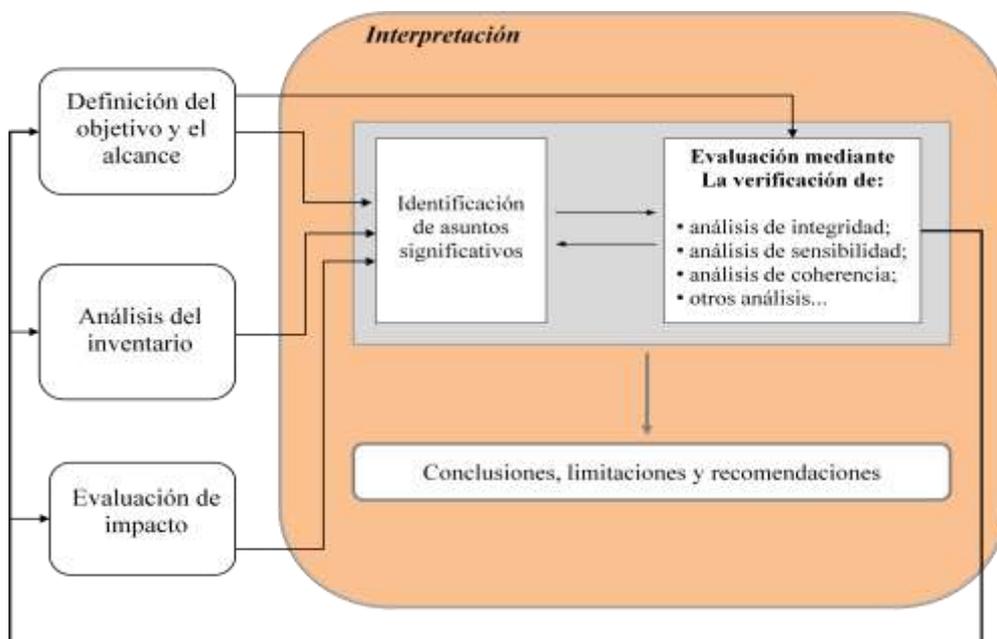
Al no existir consenso en la utilización de un único método de evaluación del impacto, la norma ISO 14040-44 (2006) recomienda aplicar diferentes métodos de evaluación y realizar un

análisis de sensibilidad para evaluar cómo influye el método aplicado en los resultados del estudio.

#### 1.5.4. Interpretación de resultados

Según la norma ISO 14040-44 (2006), en esta última etapa de un ACV, se combina la información obtenida en la fase de inventario y evaluación del impacto para llegar a identificar las variables significativas teniendo en cuenta los análisis de sensibilidad realizados. La interpretación de resultados arroja una serie de conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones, siempre de acuerdo con los objetivos y el alcance del estudio.

La Figura 1.13 muestra las relaciones de la etapa de interpretación con otras etapas del ACV. Las etapas de definición del objetivo y el alcance y de interpretación del análisis del ciclo de vida constituyen el marco de referencia, mientras que las otras etapas del ACV (ICV y EICV) generan información sobre el sistema en estudio.



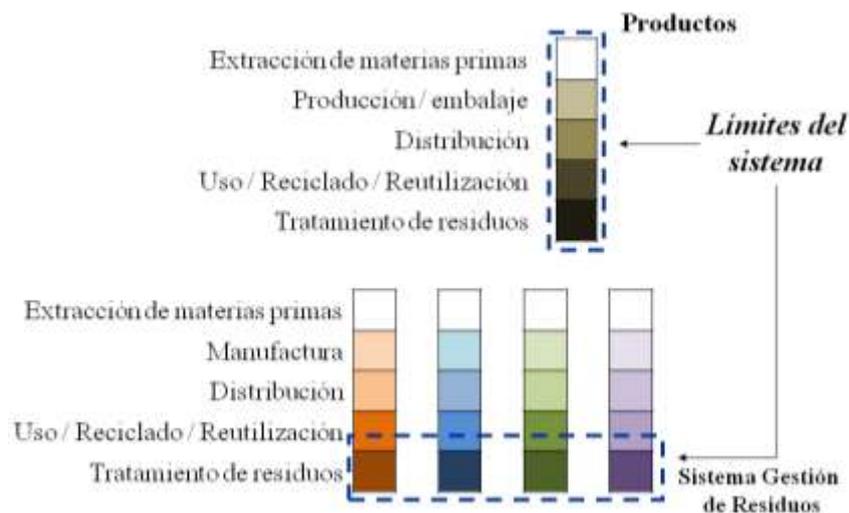
**Figura 1.13.** Relaciones entre los elementos en la etapa de interpretación con las otras etapas del ACV.

#### 1.6. Aplicación de la metodología de ACV a la gestión de los residuos sólidos

En el campo de la gestión de residuos sólidos se está avanzando en los últimos años en cuanto al desarrollo de herramientas que permitan apoyar decisiones de planificación a nivel regional y nacional en distintos países. En el ámbito internacional existe un orden jerárquico estratégico para las alternativas de gestión de los residuos sólidos descrito en el apartado 1.2.1 de este capítulo. Sin embargo, este orden de prioridades carece de base científica, y no garantiza la minimización de los impactos ambientales del sistema de gestión planteado ni la combinación óptima de las alternativas disponibles. Por otra parte, las condiciones en cada región pueden modificar la jerarquía planteada y hacer prevalecer unas acciones sobre otras para cada fracción de residuos considerada. En este marco, la European Commission Communication (COM 666, 2005) ha recomendado que la metodología ACV sea utilizada conjuntamente con la jerarquización estratégica para la gestión de los residuos y este concepto ha sido confirmado por la Directiva 2008/98/CE (CE, 2008). Por otra parte, la considerable atención que en la actualidad reciben los problemas ambientales como el calentamiento global, la lluvia ácida, la eutrofización, entre otros, requieren de datos adicionales sobre las cargas ambientales asociadas

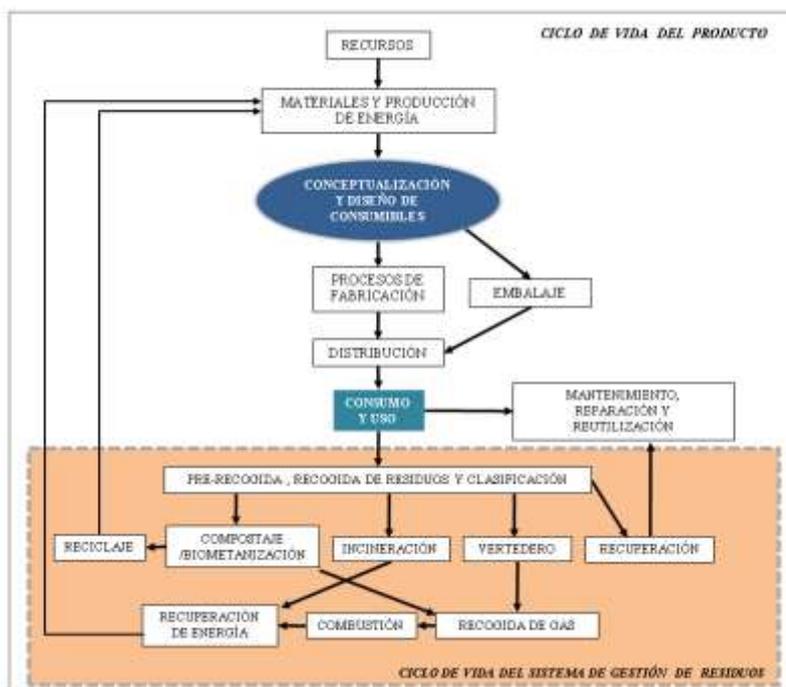
a cada etapa del sistema de gestión de residuos, a fin de apoyar las decisiones con respecto a cada una de estas preocupaciones ambientales. Es en este punto donde ha cobrado importancia la herramienta del Análisis del Ciclo de Vida aplicada a la optimización de los sistemas de gestión de residuos.

El concepto de ciclo de vida aplicado a la gestión de residuos difiere del concepto del ciclo de vida aplicado a productos en cuanto a las etapas que incluye. La Figura 1.14 muestra la diferencia entre los límites del sistema producto y los del sistema gestión de residuos, en tanto la Figura 1.15 muestra el detalle de las etapas que forman parte de cada sistema.



**Figura 1.14.** Comparación entre los límites del sistema producto y sistema de gestión de residuos.

Fuente: McDougall, (2004)



**Figura 1.15.** Esquema del ciclo de vida de un sistema de gestión de residuos vs. sistema producto

Fuente: Bovea et al., (2011)

La aplicación de la metodología ACV a los sistemas de gestión de residuos sólidos urbanos es una práctica que ha empezado a aplicarse en los últimos años en diversos países europeos, tal y como lo demuestran los estudios de Bovea *et al.* (2006, 2010) en España, Buttol *et al.* (2007) y Cherubini *et al.* (2009) en Italia, Khoo (2009) en China, Kim y Kim (2010) en Korea, Niskanen *et al.*, (2009) en Finlandia, Stenmarck *et al.*, (2009) en Chile, Tunesi (2011) en England, Antonopoulos *et al.*,(2012) en Grecia, Saheri *et al.*, (2012) en Malasia, la revisión de Othman (2013) en países asiáticos, Kaazke *et al.*, (2013) en Siberia, Rusia, entre otros. Sin embargo, para otras corrientes de residuos tales como las de origen industrial, y muy especialmente los residuos de construcción y demolición (RCD), las investigaciones son incipientes (Tarantini *et al.*, 2009) y no existen hasta la fecha estudios comparables a los publicados en el campo de los residuos sólidos urbanos. Por esa misma razón, no se han desarrollado bases de datos de inventarios de ciclo de vida característicos de los residuos objeto de estudio en esta tesis, los RCD.

La literatura recoge algunas experiencias de aplicación de la metodología ACV al campo de la gestión de los RCD. Blengini (2009) realizó un estudio de aplicación de la metodología ACV a la demolición de un edificio en Italia, analizando diferentes escenarios de gestión del fin de vida de los residuos. Utilizó datos propios recogidos durante la demolición y otros de la base de datos Idemat (2001) y ETH-ESU 96 (ETH-ESU 1996). Ortiz *et al.*, (2010) comparó tres escenarios de gestión de RCD de los residuos procedentes de una construcción nueva, tomando como unidad funcional la generación de RCD en kg por metro cuadrado construido, en Cataluña, España. Los escenarios analizados fueron vertido, reciclaje e incineración, utilizando para el ICV valores procedentes de la bases de datos Ecoinvent (SCLCI 2008). Blengini *et al.*, (2010) analiza los beneficios del reciclaje de la fracción inerte y metales en Turín, Italia, utilizando datos locales del sistema de gestión. Asimismo publica datos de plantas de trituración móviles, semi-móviles y fijas en funcionamiento en la provincia di Torino, incluyendo en estas últimas la clasificación del RCD. Carpenter *et al.*, (2012) realizó una evaluación del ciclo de vida de distintas opciones de gestión residuos de construcción y demolición utilizando la herramienta *Municipal Solid Waste Decision Support Tool* de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. En este estudio se da especial atención a los residuos de madera.

En otro orden, Coelho *et al.*, (2013a) y Coelho *et al.*, (2013b) estudiaron aspectos ambientales y económicos de la gestión de RCD en plantas de gran escala en Lisboa. Sus conclusiones afirman que desde el punto de vista ambiental se obtienen beneficios por el reciclaje de RCD en cuanto a emisiones de CO<sub>2</sub> superiores a los impactos generados. Sin embargo no realiza un ACV de sistema.

A continuación, se describe cómo aplicar cada una de las etapas de la metodología ACV, descritas en el apartado 1.5, a la evaluación ambiental de sistemas de gestión de residuos.

### **1.6.1. Definición de objetivos y alcance del ACV en los sistemas de residuos**

La razón que lleva a aplicar la metodología ACV al campo de gestión de residuos puede ser muy variada. Algunos ejemplos de objetivos a alcanzar con su aplicación son:

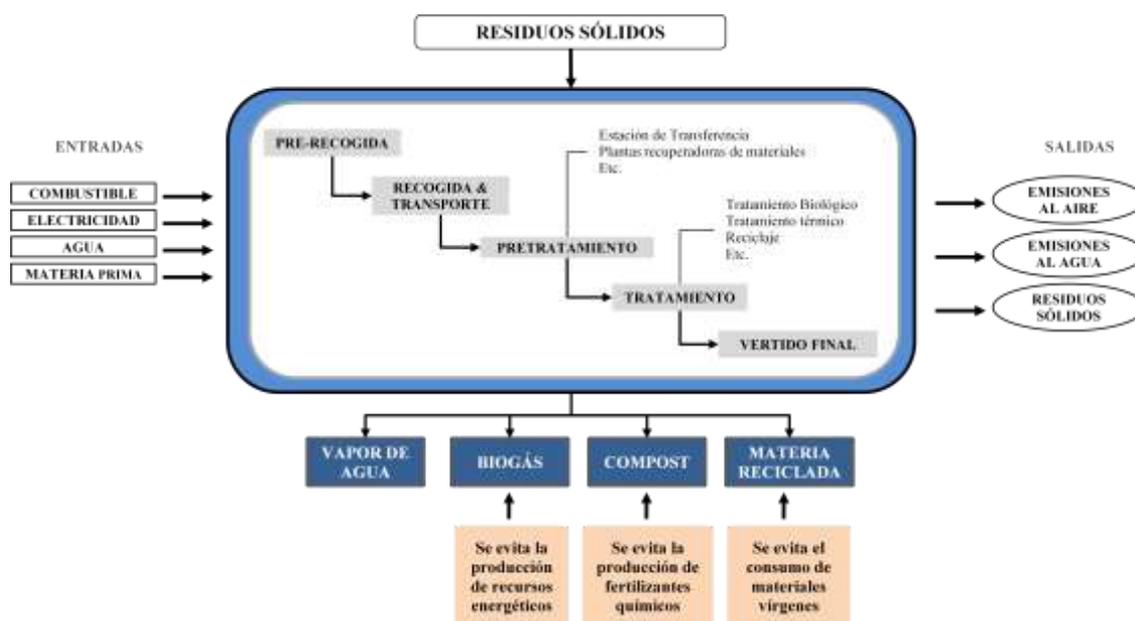
- Comparación de diferentes escenarios de gestión de residuos de un mismo proyecto, con el objetivo de identificar el que presenta mejor comportamiento ambiental.
- Identificación de la etapa del ciclo de vida del sistema de gestión de residuos más sensible a una mejora de su comportamiento ambiental.

- Cuantificación de la mejora ambiental aportada por la mejora de una etapa concreta del ciclo de vida del sistema de gestión de residuos, por ejemplo inclusión- exclusión de operaciones unitarias en la etapa de clasificación.
- Comparativa entre diferentes técnicas o tratamientos aplicables a los residuos en una misma etapa, por ejemplo, en la etapa de tratamientos: compostaje vs. reciclaje; vertido vs. incineración; una misma técnica con y sin recuperación de energía (por ejemplo, incineración).
- Predecir las cargas ambientales del sistema en su totalidad.

Por otra parte, el uso que se pretende dar a los resultados puede ser diferente, entre otros:

- Incorporación de los indicadores ambientales para cada escenario en los planes de gestión de residuos de un municipio concreto (junto con los indicadores económicos o técnicos de cada alternativa).
- Uso interno por parte de la empresa gestora de residuos.

En cuanto a los límites del sistema, la Figura 1.16 muestra en forma de entradas y salidas los que habitualmente suelen establecerse en la gestión de residuos. En general, como entradas al sistema, además de los residuos, se tienen combustible, electricidad, agua y materias primas. Como salidas, se consideran las emisiones al agua y al aire, los flujos de materiales sólidos y los productos extraídos para su comercialización (energía, compost y materiales reciclados), que se contabilizan como cargas evitadas.



**Figura 1.16.** Límites de un sistema de gestión de residuos sólidos.

*Fuente: Bovea et al., (2011)*

Generalmente, las infraestructuras necesarias para el desarrollo de cada etapa o tratamiento suelen dejarse fuera del alcance del estudio de ACV.

La evaluación del sistema de gestión con ACV puede realizarse en la instancia de planificación u operación del mismo sistema. En el primer caso, permite definir el escenario óptimo desde el punto de vista ambiental, en el segundo posibilita plantear mejoras a partir de la identificación de sus puntos críticos y además, evaluar objetivos de minimización y reciclaje. En ambos casos se constituye en una herramienta de apoyo a las decisiones.

El alcance del ACV de los RCD requiere la definición de “cuna” y “tumba” de los residuos. A los fines del Ciclo de Vida de los residuos en general, el mismo se considera desde el momento en que un producto se vuelve residuo (cuna) hasta el momento en que se produce su retorno al ambiente (tumba).

En cuanto a la unidad funcional del ACV, cabe señalar que históricamente ha estado vinculada a productos y se ha expresado en términos de “salida” del sistema. En contraste, la función de un sistema de residuos no es generar un producto, si no manejar los residuos de un área determinada en un tiempo dado. Tomando en cuenta lo dicho, la unidad funcional más comúnmente utilizada es la gestión de 1 tonelada de residuos generada en la zona de estudio, con su composición específica. Existe también la posibilidad de considerar como unidad funcional la gestión de la producción media de residuos generados en el área de estudio durante un periodo de tiempo determinado (1 año, habitualmente).

### **1.6.2. Inventario del ciclo de vida de los residuos**

El ICV de un sistema de gestión de residuos se construye contabilizando las entradas y salidas de cada etapa del sistema. En lo que sigue se consignan los elementos principales de cada una: recogida, transporte, clasificación, tratamientos y disposición final.

- **Recogida:** La contribución al impacto durante la etapa de recogida viene dada por el consumo de materiales y recursos energéticos necesarios para la producción de bolsas de polietileno de baja densidad (PEBD) y contenedores (plásticos, metálicos, de rafia). Particularmente se contabiliza la materia prima requerida para producir los diferentes componentes y los consumos relativos a los procesos de fabricación necesarios (inyección, mecanizado, forjado, entre otros).
- **Transporte:** El impacto ambiental producido durante el transporte de los residuos se debe al consumo de combustible. Si se cuenta con datos adecuados se puede diferenciar entre el gasto durante las operaciones de la recogida (los traslados durante la recogida, las paradas realizadas y el trabajo hidráulico que debe desempeñar el camión para la descarga de los contenedores) y el gasto a causa del traslado del residuo, una vez recogido, entre las distintas instalaciones de tratamiento o vertido.
- **Plantas de clasificación:** Los impactos que producen las plantas de clasificación, también llamadas de pre-tratamiento, son originados, principalmente, por los consumos de electricidad, agua y combustible que se requieren para su funcionamiento.
- **Tratamientos:** los tratamientos pueden ser básicamente térmicos, biológicos o de reciclaje, según la corriente residual involucrada en el sistema de gestión bajo estudio: domiciliario, industrial, entre otros. En general, el inventario incluye como entradas los consumos energéticos, recursos naturales y materias primas necesarios para el proceso de que se trate, como salidas las emisiones producidas, y como carga evitada la cantidad equivalente de materia virgen que sustituiría al material reciclado producido o la energía procedente de la recuperación del calor que se produce en la combustión.
- **Vertido:** el ICV de esta etapa incluye como entradas la energía, agua y el combustible necesarios para la explotación del vertedero. Como salidas, se obtienen gas (emisiones al aire), lixiviados (emisiones al agua y al suelo) y residuos sólidos resultantes de los procesos internos del vertedero. La generación de gas y lixiviado depende de la fracción de residuo depositada en vertedero. Los lixiviados se

producen a consecuencia de dos fuentes principales: la descomposición de los residuos biodegradables, los cuales contienen humedad, y las aguas de escorrentía.

### **1.6.3. Evaluación de impacto del ciclo de vida de los residuos**

Con el fin de facilitar el manejo de los datos de inventario y su relación con las categorías de impacto y sus factores de caracterización, conviene utilizar una hoja de cálculo o alguno de los programas informáticos descritos en el apartado 1.7. Siguiendo la metodología propuesta por la norma ISO 14040-44 (2006), se obtendrán indicadores ambientales para las diferentes categorías de impacto que se deseen analizar y, opcionalmente, indicadores ambientales globales mediante la aplicación de un método de evaluación del impacto.

Es importante señalar que a la carga evitada, es decir, el ahorro como consecuencia de la reducción del uso de material virgen, la producción de energía o la no producción de fertilizantes químicos, se le asignan valores de impacto negativos.

### **1.6.4. Interpretación de resultados en ACV de residuos**

En esta fase se analizan los resultados obtenidos de acuerdo con los objetivos y el alcance del estudio. Las conclusiones y recomendaciones pueden centrarse en la identificación de oportunidades de mejora en general, o de cada etapa en particular; en la evaluación global del sistema y la comparación con otros escenarios de gestión para el mismo sistema, entre otras.

## **1.7. Herramientas informáticas de ACV aplicadas a la gestión de los RCD**

En cuanto a programas informáticos de ACV disponibles, existen herramientas genéricas de ACV muy desarrolladas tales como Gabi (PE International, 2004), y SimaPro (Pré Consultants, 2008), que permiten evaluar, entre otros, productos relativos a la construcción, pero no tienen incorporados aún sistemas de gestión de RCD ni de otro tipo, si no que contienen procesos parciales. Estos programas utilizan las diferentes bases de datos tales como Ecoinvent (SCLCI, 2008), BUWAL 250 (SAEFL, 1998), Idemat (Idemat, 2001), entre otras. Esta última es una herramienta para la selección de materiales en el proceso de diseño y proporciona una base de datos con información técnica sobre materiales, procesos y componentes con énfasis en la información medioambiental.

Las bases de datos citadas están orientadas a brindar información sobre las cargas ambientales de materiales de construcción a ser utilizados para la evaluación de edificios en la etapa de planificación, y por tanto, no son adecuadas para aplicarlas a sistemas de gestión de RCD. En este sentido cabe señalar que los ICV de productos y los de residuos se solapan en algún punto, pero están elaborados con enfoques y utilidades diferentes e incluso distintas unidades funcionales. Por otra parte, todas estas bases de datos están disponibles a escala europea o incluso mundial, lo que puede inducir a resultados erróneos al suponer la aplicación de tecnología europea en otros países. Doka (2007), por ejemplo, elaboró un inventario de ciclo de vida genérico para varios materiales de construcción. Incluye tres alternativas de tratamiento de materiales de construcción posibles: reciclaje directo, reciclaje (parcial) después de la clasificación y disposición final directa sin reciclaje (vertido o incineración) y no considera las cargas evitadas por el reciclaje. El ICV propuesto para estas alternativas contiene datos estimados a partir de instalaciones suizas.

En otro campo, se ubican programas informáticos característicos de sistemas de gestión de residuos sólidos tales como IWMMM (Integrated Waste Management Model for Municipalities) (Cirko *et al.*, 2000), MSW-DST (Municipal Solid Waste Decision Support Tool) (Weitz *et al.*,

2000), IWM-1 e IWM-2 (McDougall, 2001), WISARD (Ecobilan, 1999), WARM (US EPA, 2010), IWM (EPIC, 2002) y LCA-IWM (den Boer, *et al.*, 2007) EASEWASTE (Environmental Assessment of Solid Waste Systems and Technologies) (Kirkeby *et al.*, 2005) WRATE (Waste and Resources Assessment Tool for the Environment) (Brown, 2007) orientados predominantemente a residuos sólidos de origen domiciliario y aplicables en los países de elaboración con bases de datos regionales. Algunos de estos modelos de inventario consideran una mínima fracción de RCD correspondiente a los generados en pequeñas remodelaciones o ampliaciones de construcciones domiciliarias, pero no se ocupan de los RCD a escala industrial. En relación al programa informático WARM (US EPA, 2010), cabe señalar que en la última versión, 3ª edición, se han incorporado nuevos factores de emisión de gases efecto invernadero a seis materiales de construcción y demolición: concreto asfáltico, tejas de asfalto, yeso, aislamiento de fibra de vidrio, pisos de vinilo, y pisos de madera. Sin embargo este programa informático sólo calcula consumos energéticos y emisiones de CO<sub>2</sub> y es de aplicación específica en los países EE. UU. y Canadá. Por otra parte, WISARD permite modelar alternativamente el sistema de gestión de residuos, incluidos clasificación, reciclaje, compostaje, digestión anaerobia, depósito en vertederos e incineración. Este programa informático utiliza una base de datos con parámetros recogidos en el Reino Unido, Francia, Nueva Zelanda y la base de datos completa Ecobilan/Ecobalance.

A modo de resumen, la Tabla 1.18 y Tabla 1.19 muestran la comparativa entre las herramientas descritas anteriormente en cuanto a país, precio, indicadores que incluyen y categorías de impacto consideradas en el estudio de ACV (indicadores ambientales).

**Tabla 1.18** Características de programas informáticos de evaluación del impacto (Bovea *et al.*, 2011)

Programa informático	Desarrollador	País	Año última versión	Precio	Indicador Ambiental	Indicador Económico	Indicador Social
IWM-2	Procter & Gamble	EE. UU.	2004	~200 € <sup>(1)</sup>	✓	✓	
IWMMM	University of Waterloo	Canadá	2004	Gratuito <sup>(2)</sup>	✓	✓	
WARM	Environmental Protection Agency (EPA)	EE. UU.	2009	Gratuito <sup>(3)</sup>	✓		
LCA-IWM	Darmstadt University of Technology	Alemania	2005	Gratuito <sup>(4)</sup>	✓	✓	✓
WISARD	Ecobilan	UK	2008	n/d	✓	✓	
EASEWASTE	Technical University of Denmark	Dinamarca	2008	Gratuito <sup>(5)</sup>	✓		
MSW-DST	RTI International	EE. UU.	1999	n/d	✓	✓	
WRATE	Environmental Agency	UK	2008	3.220 € <sup>(6)</sup>	✓		

(1) Precio del libro *Gestión integral de residuos: Inventario de ciclo de vida* (McDougall *et al.*, 2001).

(2) Descargable desde <http://www.iwm-model.uwaterloo.ca/>.

(3) Descargable desde [http://www.epa.gov/climatechange/wycd/waste/calculators/Warm\\_home.html](http://www.epa.gov/climatechange/wycd/waste/calculators/Warm_home.html).

(4) Descargable desde <http://www.iwar.bauing.tu-darmstadt.de/abft/Lcaiwm/Main.htm>.

(5) Programa informático gratuito al realizar el curso de entrenamiento (no gratuito). <http://www.easewaste.dk/>.

(6) Precio licencia estándar <http://www.environment-agency.gov.uk/research/commercial/102922.aspx>.

**Tabla 1.19** Categorías de impacto en programas informáticos de evaluación (Bovea *et al.*, 2011)

Programas informáticos	Calentamiento global	Acidificación	Eutrofización	Formación de foto-oxidantes	Agotamiento del recurso abiótico	Reducción de la capa de ozono	Toxicidad humana
IWM-2	✓						
IWMMM	✓	✓		✓			
WARM	✓						
LCA-IWM	✓	✓	✓	✓	✓		✓
WISARD	✓	✓	✓		✓		
EASEWASTE	✓	✓	✓			✓	✓
WRATE	✓	✓	✓		✓		✓

Fuente: Bovea *et al.*, (2011)

### 1.8. Tendencias internacionales de las líneas de investigación en torno a los RCD

La evolución internacional que ha tenido la investigación relacionada con la gestión de RCD ha sido tratada recientemente en los trabajos de Lu *et al.*, (2011) y Yuan *et al.*, (2011). Además se analizan las tendencias de las investigaciones más recientes y se identifican las líneas futuras en este campo.

En la primera, Lu *et al.* (2011) dieron a conocer un análisis de las publicaciones existentes, durante el periodo 1996-2011, en cuanto a la gestión de los RCD. Los resultados demostraron que la jerarquía internacional de residuos ha sido considerada en todas las publicaciones, siendo los temas principales desarrollados, en orden preferente, la reducción, la generación y el reciclaje. La disposición final y la reutilización fueron los temas menos estudiados.

En otro orden advirtieron que, de las etapas del ciclo de vida de las obras civiles (diseño, construcción, mantenimiento y demolición), los estudios se enfocan sólo sobre los RCD de las de construcción y demolición.

En base a sus observaciones, Lu *et al.* (2011) recomendaron las siguientes investigaciones futuras:

- Investigar los problemas de RCD en ámbitos más amplios que incluyan el diseño y el mantenimiento en el ciclo de vida de los proyectos.
- Extender el enfoque de gestión del RCD a etapas superiores, tales como la producción de los materiales.
- Realizar medidas de tasas de generación de RCD en países emergentes, que permitan plantear sistemas de gestión, comparar distintas estrategias y optimizarlos.
- Mejorar la eficacia de enfoques de gestión de residuos (por ejemplo, sistema de tarificación de RCD), basado en nuevos conceptos de gestión (por ejemplo, responsabilidad extendida del productor).

Por otra parte, según el mismo estudio, se encuentra que existe un desequilibrio entre los resultados de la investigación obtenidos en distintas regiones según su grado de desarrollo económico. La mayoría de las 147 publicaciones analizan diferentes aspectos de la gestión de RCD en países/regiones desarrollados, mientras que sólo un pequeño número de documentos proceden de países emergentes. Debido a esto, en investigaciones futuras los autores sugirieron reunir la información de la situación actual de la gestión de los RCD en las economías emergentes. Estos diagnósticos deben de ser los puntos de partida para resolver los problemas de estos residuos, y siempre tomar en cuenta las experiencias de los países/regiones desarrollados.

En la segunda publicación, Yuan *et al.*, (2011) analizaron las tendencias de 85 investigaciones en RCD difundidas durante el periodo 2000-2009 en ocho revistas internacionales. El análisis se realizó sobre el número de artículos publicados cada año, las contribuciones de los autores principales, los métodos de investigación, los métodos adoptados de análisis de datos, y los temas de investigación tratados. Los resultados mostraron que existe un interés creciente en la investigación de gestión de RCD y que los investigadores de los países desarrollados contribuyeron significativamente al desarrollo de la investigación en la disciplina, como asimismo algunos países en desarrollo como Malasia y China.

En este mismo trabajo, se indicó que la encuesta y el estudio de casos fueron los métodos principales para la recolección de datos, y los datos fueron, en su mayoría, procesados mediante análisis descriptivo. Sin embargo, se advirtió que recientemente métodos más complicados comenzaron a desempeñar un papel importante en los temas de RCD. Entre estos se encuentran los modelos sofisticados y técnicas de simulación, utilizados como un reflejo de la realidad. De acuerdo a esta tendencia, los autores animan al desarrollo de métodos y modelos que puedan examinar la eficacia de diferentes estrategias de gestión de RCD, considerando ésta una línea de investigación prometedora.

Los temas de investigación incluyen generación, reducción, reutilización, reciclaje y gestión en general de RCD. Entre ellos, la gestión de RCD en general y reciclaje de RCD, fueron los temas dominantes y, según Yuan *et al.* (2011), seguirán siéndolo en próximas investigaciones. Los autores concluyeron aseverando que en el futuro, investigadores de las economías en desarrollo dirigirán más estudios sobre gestión de los RCD. Esto se apoya en que las obras de construcción seguirán siendo las principales actividades económicas en dichos países.

### **1.9. Conclusiones del Capítulo**

En este capítulo se ha hecho referencia a las tendencias en las estrategias para planificar la gestión de los residuos sólidos en general. En este sentido se ha mencionado la “jerarquía de residuos” y el “enfoque de la gestión integral”. Dentro de este último se ubica, como uno de los requerimientos fundamentales, la optimización ambiental de los sistemas de gestión de residuos sólidos.

Seguidamente se ha descrito la situación actual de los residuos de interés de esta investigación, los RCD. Se han expuesto las condiciones de su gestión en distintas regiones; las características de los RCD, las opciones de manejo y los elementos de un SGIRCD. Todo este contenido está apoyado en una revisión bibliográfica de los RCD en general.

Se ha referido y analizado el marco normativo de los RCD a nivel nacional e internacional. Se ha detectado que existen amplias diferencias en los niveles de regulación atendiendo a las realidades regionales.

Se ha descrito la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y se ha analizado su aplicación a la gestión de residuos. Se han revisado los modelos de ACV y bases de datos aplicadas a la gestión de residuos y específicamente RCD. Adicionalmente se han citado las tendencias de investigación identificadas en dos revisiones específicas de estudios con relación a la gestión de RCD. De este modo, el Capítulo 1, es el marco teórico y la base para definir la investigación que se diseña en el siguiente Capítulo 2.

## Capítulo 2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

---

### **Resumen**

En este Capítulo se expone la formulación del problema a abordar y la justificación de la investigación. Se enuncian las hipótesis de la investigación, y los objetivos generales y específicos que se plantearon para demostrar las hipótesis enunciadas.

### **2.1. Justificación de la investigación y formulación del problema**

Desde mediados de la década de los años '90 hasta la actualidad, el interés por la gestión de los RCD en el mundo ha venido en constante incremento a causa de detectarse problemas de contaminación ambiental y pérdida de recursos por su abandono sin recuperación. Distintas investigaciones se han ocupado de diversos aspectos relativos a la temática, como así también las administraciones públicas han implementado programas y planes de gestión de los RCD.

Asimismo, se han realizado estudios relativos a la prevención en la generación y caracterización de RCD, técnicas de valorización (especialmente reciclaje) de las distintas fracciones que lo componen y disposición final.

La concepción de la gestión de residuos sólidos como un sistema integral es un tanto reciente (año 2000), adoptando de este modo una visión holística de la gestión del ciclo de vida del residuo, desde la generación hasta su disposición final. En este contexto surge la aplicación de la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) como una herramienta que permite evaluar desde el punto de vista ambiental un sistema de gestión integral de residuos.

#### **2.1.1. Problemática de la evaluación ambiental de los SGIRCD**

Las tendencias internacionales de las líneas de investigación en torno a los RCD detectan y recomiendan dos orientaciones principales para futuras investigaciones: la necesidad de ampliar desarrollos sobre gestión de RCD en países emergentes; y el desarrollo de métodos y modelos que permitan comparar distintas estrategias de gestión de RCD y determinar su efectividad. Esta última línea de investigación se considera prioritaria.

La evaluación ambiental de SGIRCD, hasta el momento, no cuenta con metodologías ni herramientas específicas que permitan obtener juicios de valor adecuados para la planificación o la selección de alternativas. Igualmente, se discutió en el marco teórico, sobre las limitaciones de la jerarquía de residuos, en torno a la rigidez de la lista de opciones propuesta. Como consecuencia existen dificultades de adaptación a las necesidades locales donde el sistema de residuos debe operar efectivamente. De este modo se reconoció que puede resultar necesario considerar esta jerarquía en un segundo plano teniendo en cuenta el enfoque de ciclo de vida del SGIRCD, en la toma de decisión.

Lo dicho anteriormente evidencia la necesidad métodos y modelos de evaluación ambiental de los SGIRCD. La técnica de ACV es la más reconocida a nivel internacional, y ha sido aplicada a la evaluación ambiental de sistemas de gestión de residuos sólidos domiciliarios, según se ha referido en el Capítulo 1. Sin embargo, su aplicación a la gestión de los RCD es un campo poco desarrollado. Existen estudios de caso parciales, algunos de ellos resueltos con sistemas de gestión modelados en programas informáticos de ACV genéricos. Las bases de datos de inventarios de ciclo de vida utilizadas corresponden a los países donde fueron recopiladas (Suiza, EE.UU., Canadá, etc.), y por lo tanto, con escasas posibilidades de ser adoptadas a la realidad de países emergentes con resultados certeros.

Dadas las circunstancias mencionadas precedentemente, la aplicación de la técnica de ACV a la evaluación ambiental de SGIRCD se enfrenta a la dificultad de obtener los datos de inventario adaptados al caso de estudio y a la zona geográfica. Éstos resultan ser escasos, y por este motivo, se requiere nuevas recopilaciones de datos específicos que abarquen todos los procesos y materiales involucrados en el ciclo de vida del SGIRCD. La información que se requiere comprende la relativa al funcionamiento de los sistemas de gestión de RCD y sus etapas, datos cuantitativos de procesos individuales y la relación entre ellos. Detectado este déficit, esta investigación presta especial atención a la obtención de inventarios de ciclo de vida representativos de la región donde se aplique.

Respecto de las categorías de impacto utilizadas en la fase de evaluación de impacto del ciclo de vida de la gestión de los residuos, en general se han empleado las tradicionales tal como se muestran en la Tabla 1.19, referidas a cuantificar contaminación del aire, el agua y el suelo, y en ocasiones el agotamiento de los recursos abióticos y efectos sobre la salud. En el caso de los residuos en general, y en particular de los RCD, es importante considerar los impactos por ocupación del suelo, categoría que no ha sido incluida aún en los programas informáticos de cálculo ni en las investigaciones publicadas. Esta última categoría se analizará particularmente en esta investigación, al igual que sus indicadores, eligiendo uno apropiado para la región de Mendoza (Argentina).

Además de lo anterior, una condición fundamental para la aplicación de cualquier herramienta o método de evaluación es la certeza de los datos de entrada al sistema: las cifras relativas a la generación de RCD. En este sentido se ha podido constatar que la información generada sobre la composición y cantidad de RCD en distintas regiones, es escasa y no siempre fiable; se carece de datos estadísticos y de métodos estandarizados de caracterización. Debido a ello, se requiere realizar medidas de tasas de generación de RCD que garanticen la validez de los resultados. La elaboración de un procedimiento directo de caracterización a nivel regional es objeto de esta investigación.

En Latinoamérica en general, incluyendo Argentina, los sistemas de gestión de RCD son incipientes. Debido a ello, se necesita de métodos y herramientas que permitan evaluar los sistemas actuales y las mejoras posibles, desde el punto de vista técnico, económico, social y

ambiental. Este último aspecto es el que se aborda en esta tesis, con el desarrollo de una metodología basada en la técnica de aplicación de ACV, capaz de evaluar desde una perspectiva ambiental SGIRCD. A su vez, y por el hecho de la carencia a nivel internacional, es necesario que esta metodología se plantee de forma general, con el fin de que pueda adaptarse en cualquier región/país.

### **2.1.2. Preguntas de la investigación**

Dado el problema descrito, surgen las siguientes preguntas que se pretenden responder con esta tesis:

- ¿Existen datos suficientes para abordar la evaluación ambiental de un sistema de gestión en cualquier región? ¿Cuáles son los requerimientos de tales datos? ¿Cómo se pueden generar?
- Referido a las opciones de gestión: ¿Es compatible la jerarquía de gestión de residuos de la CE (2008) con los resultados de evaluar un sistema de gestión de RCD desde el punto de vista ambiental con la metodología de ACV? ¿Los resultados varían según la región que da origen a los residuos?
- ¿Cómo se pueden determinar los puntos críticos del impacto ambiental de un sistema integral de gestión de RCD? ¿Qué variables influyen en su determinación? ¿Cómo se relacionan?
- ¿Cuál es el impacto ambiental ocasionado por la disposición no controlada de RCD? ¿Qué categorías de impacto e indicadores son adecuados para cuantificar el mismo considerando el ciclo de vida de la gestión del residuo?
- ¿Cuál es la alternativa óptima de la gestión integral de RCD desde el punto de vista ambiental en una región determinada? ¿Cuáles son las categorías de impacto más adecuadas para dicha evaluación?
- ¿Cómo influyen las características regionales en el inventario de ciclo de vida del RCD?
- ¿Cómo resulta el impacto ambiental de la extracción de áridos con relación al reciclaje de residuos inertes de los RCD? ¿Cuál es la mejor opción de tratamiento para las fracciones de RCD no inertes?
- ¿Qué aspectos caracterizan la gestión de RCD en un contexto regional/local y qué oportunidades de mejora pueden plantearse desde el punto de vista ambiental?

### **2.2. Hipótesis**

Teniendo en cuenta el problema identificado y en base al marco teórico que comprende la investigación, se enuncian las siguientes hipótesis:

Hipótesis 1. Es posible desarrollar una metodología de evaluación ambiental específica para SGIRCD que sea flexible y aplicable a distintas regiones/países.

Hipótesis 2. La solución óptima de la gestión integrada de los RCD desde el punto de vista ambiental evaluada con enfoque de ciclo de vida puede no coincidir con la aplicación de la jerarquía de residuos.

### **2.3. Objetivos**

A los fines de demostrar las hipótesis enunciadas se han planteado los siguientes objetivos generales y específicos:

### **2.3.1. Objetivo general**

El objetivo general de esta investigación es desarrollar metodologías y herramientas que permitan analizar, desde una perspectiva de ciclo de vida, el desempeño ambiental de sistemas integrados de gestión de RCD.

### **2.3.2. Objetivos específicos**

En función del objetivo general se desprenden los siguientes objetivos específicos:

- a) Identificar los elementos necesarios para planificar y evaluar un SGIRCD. Desarrollar un procedimiento de obtención de datos de generación de RCD.
- b) Desarrollar una metodología de evaluación ambiental de SGIRCD por aplicación de la técnica de análisis ciclo de vida, aplicable en distintos países o regiones.
- c) Seleccionar las categorías de impacto ambiental y sus indicadores, adecuados para evaluar el perfil ambiental de SGIRCD.
- d) Elaborar un inventario que abarque todos los procesos y materiales involucrados en el ciclo de vida de la gestión de los RCD.
- e) Obtener una herramienta informática de cálculo que facilite la aplicación de la metodología de evaluación ambiental de SGIRCD
- f) Validar la metodología de evaluación ambiental de SGIRCD con casos de aplicación en distintas regiones y utilizando la herramienta informática.

## **2.4. Metodología**

Las actividades seleccionadas para la consecución de los objetivos definidos previamente fueron:

- Recopilación de antecedentes sobre aplicación de la metodología ACV a sistemas de gestión de residuos sólidos en general.
- Análisis de datos de entrada necesarios para la planificación y evaluación de SGIRCD: estudio de la generación de RCD.
- Estudio de las metodologías de caracterización de RCD, análisis de su aplicabilidad a la región (Mendoza). Diseño de un procedimiento de caracterización con base estadística. Aplicación regional.
- Identificación de los datos de inventario necesarios para planificar y evaluar un SGIRCD: análisis de los sistemas de gestión de RCD implementados a nivel local, nacional e internacional. Estudio de escenarios alternativos de gestión, con recogida no-selectiva/selectiva, transporte, valorización y vertido controlado/incontrolado. Planteamiento de opciones para cada etapa de la gestión.
- Elaboración de una metodología de evaluación ambiental con técnica de ACV de cada una de las etapas de las que se compone la gestión de RCD. Revisión bibliográfica de inventarios sobre gestión de RCD publicados. Recopilación de información de campo de los procesos y materiales involucrados en las distintas etapas: recogida, transporte, plantas de clasificación, transferencia y reciclaje de RCD y gestión de vertederos controlados.
- Análisis de las categorías de impacto ambiental frecuentemente utilizadas en ACV de sistemas de gestión de residuos en general. Selección de las categorías y sus indicadores que permitan evaluar el perfil ambiental de la gestión de los RCD.
- Estudio de indicadores para categoría uso del suelo de aplicación regional y adaptación del mismo a la actividad de gestión de RCD. Aplicación a casos en la región.

- Implementación de la metodología de evaluación ambiental de SGIRCD desarrollada en una herramienta informática sencilla, que permita el cálculo automatizado de los indicadores de categoría de impacto seleccionados.
- Recopilación de datos de inventario para distintos estudios de caso. Cuantificación y valoración de impactos ambientales de los escenarios alternativos de gestión de RCD con aplicación de la herramienta informática sobre estudios de caso. Identificación de los aspectos críticos desde el punto de vista ambiental. Obtención de conclusiones para cada caso de aplicación.

En este capítulo se expone y manifiesta el problema de la falta de metodologías, herramientas y datos de inventario de ciclo de vida al evaluar SGIRCD desde el punto de vista ambiental. Por otra parte las tendencias de investigación a nivel internacional respecto a la gestión de los RCD se orientan hacia los países emergentes, con la necesidad de resolución de problemas de carácter regional. Estas consideraciones son la base y sustento que motivaron la presente tesis.

## Capítulo 3. GENERACIÓN DE RCD. DATOS DE CARACTERIZACIÓN

---

### **Resumen**

En este capítulo se investiga y expone acerca de las metodologías de caracterización de RCD tanto en obras civiles como a nivel regional. Se las tipifica y se identifican las variables involucradas en cada caso. Se analizan sus fortalezas y debilidades según las bases de datos disponibles. Finalmente, se aporta un procedimiento de caracterización que incluye un método directo para determinar la composición de los RCD en base a un muestreo aleatorio estratificado. Se describen las herramientas estadísticas para la estimación de parámetros dentro de un intervalo de confianza que dé fiabilidad de los resultados.

### **3.1. Introducción**

La elaboración y ejecución de planes de gestión de RCD, tanto para una región dada como para una obra civil individual, requiere como primera etapa la consecución de los datos de caracterización. El objetivo de la misma es conocer la cantidad, la composición y las propiedades físico-químicas de cada categoría de material residual generada.

A nivel regional, los datos de caracterización permiten seleccionar y valorar adecuadamente la viabilidad de diferentes tecnologías de tratamiento (Lund, 1996), y definir la política de gestión. En el caso de disposición final en terreno, los datos de caracterización se utilizan para determinar los compuestos químicos potenciales que serán emitidos en forma de lixiviados, y para estimar la vida media útil del vertedero.

En el caso de obras civiles individuales los datos permiten elaborar los planes de gestión interna de RCD. Los objetivos principales de estos planes son planificar el manejo y control de los RCD en las obras y evaluar los costos de gestión. Por otra parte, las condiciones en las que se realiza la gestión interna de los RCD tienen una gran influencia en sus posibilidades de recuperación y reciclaje posterior, por lo que la implementación de medidas de producción limpia durante el manejo será un factor determinante (Mercante *et al.*, 2010).

Tal como se referenció en el apartado 1.2.2, los resultados de la caracterización de los RCD dependen de muchas variables: cantidad anual de superficie construida y demolida, tipos de

proyectos considerados, etapas de ejecución de las obras, hábitos constructivos, materiales utilizados en la construcción, entre otras.

Las unidades frecuentemente utilizadas para las cantidades de RCD en obras de edificación son t/m<sup>2</sup>, m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>, t/porcápita/año, t/año (Mercante, 2005). Cada una tendrá una aplicación diferente según el objetivo de la caracterización (planificación de RCD de obra individual o planificación de gestión de RCD a nivel regional).

En cuanto a las fracciones a considerar en la composición, como mínimo debe estructurarse el estudio en base a una “macro-aproximación”, lo que implica tener en cuenta una clasificación en categorías principales. En el caso de los RCD, se establecen tres categorías (CE; 1999): inertes, no- especiales y especiales o peligrosos. Sin embargo, y a los fines de la valorización y comercialización, es imprescindible la adopción de una “micro- aproximación” para analizar cada categoría en sub- categorías. La Tabla 3.1 presenta una posible clasificación para las mismas.

**Tabla 3.1** Categorías y sub- categorías en el flujo de RCD

Tipo	Categorías	Sub- categorías
Inertes (IN)	Tierras y rocas	-----
	Pétreos	Hormigones (IH), morteros, áridos, concreto asfáltico (CA)
	Cerámicos	ladrillos, revestimientos, losetas, tejas
	Vidrio (VD)	vidrio plano transparente y de colores
No especiales (N-Es)	Madera (MD)	contrachapado, machimbre, puntales, tablas, pallets, madera tratada
	Cartón-Papel (CP)	corrugado de embalajes, bolsas de cal y cemento, papel oficina
	Plásticos (PL)	(PVC) policloruro de vinilo, (PET) polietileno tereftalato, (PS) poliestireno expandido, (PEBD) polietileno de baja densidad, (PEAD) polietileno de alta densidad
	Metales (MT)	plomo, aluminio, cobre, hierro, acero, bronce
	Yeso (YS)	mortero de yeso, muro seco
Peligrosos ó especiales (Es)	amianto, pinturas, solventes, envases, aditivos de hormigón, luminarias con mercurio	

Fuente: Elaboración propia

### 3.2. Caracterización de RCD en obras civiles de edificación

La caracterización de RCD en obras civiles de edificación, ya sean de construcción o demolición, se lleva a cabo, en general, en forma directa durante la ejecución de las obras. En el caso de las obras edilicias su fin es obtener índices o tasas de generación, que se designan como Ic (índice de generación en obras de construcción) e Id (índice de generación en obras de demolición). Estos a su vez pueden medirse en kg/m<sup>2</sup> o en m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. Estas tasas de generación pueden luego ser utilizadas en cálculos de residuos de obras en proyectos futuros, pero para que los resultados sean fiables los datos deben haber sido estimados de un número de muestras suficientes con una base estadística (Lu *et al.*, 2011).

Además de los cálculos directos, se han publicado algunos métodos indirectos para obtener los datos. Tal es el caso de Solís *et al.*, (2009) con el modelo Alcores aplicado en Sevilla (España); y Llatas (2011) en Andalucía (España). Este último calcula la cantidad de residuos por fracciones según el tipo de elemento constructivo del cual proviene. Ambos modelos también requieren de factores de características regionales y datos locales.

Particularmente cabe citar la publicación de Mália *et. al.*, (2013). En la misma se determinaron indicadores para estimar la cantidad de RCD generados en instalaciones a nivel mundial y por fracción residual. La generación de RCD se estimó para seis sectores: construcción nueva residencial y no residencial, demolición residencial y no residencial, y rehabilitación residencial y no residencial. Los datos necesarios para el desarrollo de los indicadores se recogieron a través de un estudio exhaustivo de estudios internacionales previos. Los indicadores determinados sugirieron que la composición media de los residuos es sobre todo de fracciones de concreto y cerámica. Específicamente para la construcción nueva residencial y no-residencial la producción de residuos de hormigón en edificios con estructura de hormigón armado se encuentra entre 17,8 y 32,9 kg/m<sup>2</sup> y entre 18,3 y 40,1 kg/m<sup>2</sup>, respectivamente. Para los sectores de demolición residenciales y no residenciales la producción de residuos en edificios con estructura de hormigón armado varía desde 492 hasta 840 kg/m<sup>2</sup> y desde 401 hasta 768 kg/m<sup>2</sup>, respectivamente. Para los sectores de rehabilitación residencial y no residencial la producción de residuos de hormigón en los edificios se encuentra entre 18,9 y 45,9 kg/m<sup>2</sup> y entre 18,9 y 191,2 kg/m<sup>2</sup>, respectivamente. Como se observa, los rangos son bastante amplios, y estos datos podrían utilizarse sólo con apoyo de experiencias locales.

En España se adopta de manera general (MARM, 2008) los índices de generación de la Tabla 3.2

**Tabla 3.2** Producción de residuos en edificación

Tipo de construcción	Cantidad RCD
Obras de edificios nuevos	120,0 kg/m <sup>2</sup>
Obras de rehabilitación	338,7 kg/m <sup>2</sup>
Obras de demolición total	1129,0 kg/m <sup>2</sup>
Obras de demolición parcial	903,0 kg/m <sup>2</sup>

Por otra parte el ItcC (2008) ha publicado tablas de generación que correlacionan porcentajes de cada fracción, etapa de obra y fracción residual, que pueden ser consultadas.

En Sao Paulo, Brasil, se estima entre 120 kg/m<sup>2</sup>- 150 kg/m<sup>2</sup> de RCD producido en edificación nueva (Careli, 2010).

De otro modo, los datos de I<sub>c</sub> e I<sub>d</sub> de una obra determinada se pueden aproximar utilizando el peso medio de los contenedores retirados de la obra, el número de contenedores que se recogen y la superficie de las misma, resultando la Ecuación 3.1.

$$I_{c,d} = \frac{P_c \times N_c}{S}$$

Ec. (3.1)

Siendo:

*P<sub>c</sub>*: Peso medio estimado del contenedor con RCD (kg)

*N<sub>c</sub>*: Número de contenedores retirados de la obra

*S*: superficie de la obra (m<sup>2</sup>)

### 3.3. Caracterización de RCD a nivel regional

Las metodologías de caracterización a aplicar a nivel regional pueden tipificarse como directas o indirectas. Las primeras son aquéllas que utilizan técnicas de separación y pesaje de las fracciones que componen el total de los residuos. Esto puede hacerse con muestras o censos sobre el total de los RCD generados en un periodo de tiempo. Las mediciones pueden tomarse a la entrada del vertedero ó a la salida de una obra civil. Por otra parte, las plantas de clasificación también aportan datos de caracterización, obtenidos del propio proceso de segregación (Mercante *et al.*, 2011). Las segundas, relacionan variables tales como el nivel de actividad de la construcción, medido en superficie construida o demolida por año e índices de generación estandarizados, medidos en peso o volumen, por metro cuadrado de superficie construida ( $I_c$ ) o demolida ( $I_d$ ). En ambos casos se requieren datos de campo específicos y metodologías de muestreo que aseguren resultados fidedignos.

#### 3.3.1. Métodos indirectos

Varias metodologías han sido publicadas en los últimos años, que han aportado procedimientos en relación a cantidad y composición del flujo de RCD (Martínez Lage *et al.* 2010, Kofoworola y Gheewala 2009, Cochran *et al.* 2007, Wang *et al.* 2004). La Tabla 3.3 resume distintos trabajos difundidos y puede observarse que se emplean en casi todos los casos los índices de generación de RCD mencionados en el apartado 3.2, medidos en  $\text{kg}/\text{m}^2$ , y la superficie construida, medida en  $\text{m}^2/\text{año}$ , para el caso de construcción nueva, renovaciones y demoliciones, con algunas variantes en renovaciones. La excepción de los casos analizados la constituye Wang *et al.* (2004) que adopta un porcentaje del peso de los materiales involucrados en las edificaciones como cantidad de RCD generada.

**Tabla 3.3** Trabajos publicados en relación a caracterización de RCD a nivel regional

Publicación-Localización	Parámetro calculado	Variables involucradas en el cálculo	Tipo de construcción	Tipo de actividad
(Wang <i>et al.</i> , 2004) Massachusetts, EE.UU.	Cantidad	Superficie construida o demolida ( $\text{m}^2/\text{año}$ ) % Peso de los materiales del edificio por unidad de superficie ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )	Edificación residencial y no-residencial	Construcción Demolición
(Martínez Lage <i>et al.</i> , 2010) Galicia, España	Cantidad	Superficie construida, renovada o demolida ( $\text{m}^2/\text{año}$ ) Índices de generación ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ó $\text{m}^3/\text{m}^2$ )	Edificación residencial, y no-residencial, y obra pública	Construcción Renovación, Demolición
	Composición	% de cada material residual		
(Cochran <i>et al.</i> , 2007) Florida, EE.UU	Cantidad	Superficie construida o demolida ( $\text{m}^2/\text{año}$ ) Índices de generación ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ó $\text{m}^3/\text{m}^2$ ) Índices de generación por trabajo realizado	Edificación residencial y no-residencial	Construcción Demolición
	Composición	% de cada material residual		Renovación
(Kofoworola y Ghewala, 2009) Tailandia	Cantidad	Superficie construida ( $\text{m}^2/\text{año}$ ) Índices de generación ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ó $\text{m}^3/\text{m}^2$ )	Edificación residencial y no-residencial	Construcción
	Composición	% de cada material residual		

Fuente: Elaboración propia

Estas metodologías requieren la utilización de datos que pueden obtenerse de estadísticas locales en el caso de la superficie construida y demolida por año; y de datos relativos a índices de generación  $I_c$  e  $I_d$  desglosados por fracción residual. Estos últimos pueden conseguirse a partir de estudios de caracterización de RCD individuales, que generalmente derivan de investigaciones académicas, por tipo de obra (construcción ó demolición) ó a través de consultas a empresas constructoras.

Así, la expresión general de cálculo para la cantidad de RCD generada en un año en una localidad resulta en la Ecuación 3.2 (simplificada de Martínez Lage (2010)).

$$Cant.RCD (kg/año) = I_c \times SC + I_d \times SD$$

Ec. (3.2)

Siendo:

$I_c$ : Índice de generación de RCD para edificación nueva ( $kg/m^2$ )

$I_d$ : Índice de generación de RCD para demolición ( $kg/m^2$ )

$SC$ : Superficie anual media de construcción ( $m^2/año$ )

$SD$ : superficie anual media de demolición ( $m^2/año$ )

Estas cantidades se refieren por lo general a la cantidad de habitantes de la localidad o región en cuestión, por lo que las unidad utilizada es ( $kg$  RCD/per cápita/ año). Finalmente, pueden realizarse contrastaciones con cantidades per cápita anuales obtenidas en otras regiones de características constructivas similares, tales como los que se han publicado en el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición de España 2008-2015 (MARM, 2008).

La dificultad que se encuentra en las metodologías indirectas es la inexistencia de datos fiables de los índices de generación regionales desglosados por fracción residual, y por tanto se complica determinar la composición. En este caso, se deberá recurrir a métodos directos para determinarla.

### 3.3.2.Métodos directos

Los métodos directos para obtener datos de caracterización de RCD a nivel regional consisten en cuantificar los RCD en el sitio donde se originan o donde se gestionan, siendo en este último caso las plantas de clasificación o los vertederos de RCD.

#### 3.3.2.1. Caracterización de RCD en plantas de clasificación

Los RCD originados en las obras son trasladados para su tratamiento. En los SGIRCD que cuentan con plantas de clasificación pueden obtenerse datos de composición cuantificando en peso o volumen las distintas fracciones residuales segregadas con destino a valorización y la fracción de rechazo. Por otra parte con los datos de peso de RCD registrados se consigue la cantidad de los residuos tratados durante un periodo determinado, 1 año por ejemplo.

Los datos obtenidos permiten tener una idea acabada de la composición de los RCD para la región a la cual la planta presta servicios. La única dificultad es que los flujos de RCD desviados antes de ir a la planta no aparecerán en la composición. Tal es el caso de venta de materiales recuperados en la misma obra, ya sea en circuitos formales o informales. De todas

formas la composición así determinada es la que efectivamente ingresa al sistema de gestión y sobre la cual pueden plantearse mejoras.

### **3.3.2.2. Caracterización de RCD en el sitio de origen**

Otra forma directa de obtener datos de composición es cuantificar las distintas proporciones de RCD generados en obras civiles. En este caso la tarea es más costosa pues se debe disponer de las instalaciones necesarias para segregar las distintas fracciones, y elementos de pesaje o medida en volumen para su cuantificación. Este hecho hace imposible pensar en clasificar todo el RCD generado en una región en un periodo determinado, por lo que se recurre a muestreo y obtención de datos estadísticos.

En cuanto a la cantidad, se pueden utilizar en estos casos metodologías indirectas como se refirió en la Ecuación 3.2, dado que no se requieren índices de generación desglosados por fracción residual.

Debido a que en Argentina, y muchos otros países de Latinoamérica y el mundo, los sistemas de gestión de RCD son incipientes y se cuenta con muy pocos datos de índices de generación desglosados por fracción residual, se propone en lo que sigue una metodología que permita estimar la composición de los RCD en forma directa.

## **3.4. Diseño de un método directo para obtener la composición de RCD a nivel regional**

Los estudios de caracterización de residuos sólidos frecuentemente se basan en razonamiento estadístico, obteniéndose en todos los casos estimaciones de los resultados. En los apartados siguientes se refieren conceptos genéricos sobre muestreo, se describe el método de muestreo utilizado, se plantean las ecuaciones para el cálculo de estimadores y se expone el procedimiento a seguir para la obtención de datos de composición.

### **3.4.1. Generalidades sobre estimación de parámetros**

La recolección de datos para la determinación de la composición de los RCD podría realizarse sobre la población total, y entonces hablamos de “censo” o sobre una parte de la misma, llamada “muestra”.

El uso del muestreo a los fines de la observación y medición de datos permite obtener información precisa acerca de la población con una inversión en tiempo y costo mucho menor que la realización de un censo exhaustivo, puede afirmarse que “...no es necesario tragarse toda la sopa para saber si la sopa está demasiado salada; si se remueve bastante, basta con probar una cucharada...” (Fine, *et al.*, 1998).

Al estimar parámetros de la población en estudio basándose en la información de la muestra pueden usarse valores puntuales (estimación puntual) o calcular un intervalo de confianza (estimación por intervalos). Definir un intervalo de confianza para un parámetro poblacional  $\theta$  al nivel de confianza  $1-\alpha$  consiste en hallar un intervalo real para el que se tiene una probabilidad  $1-\alpha$  de que el intervalo obtenido, según la evidencia muestral contiene al verdadero valor del parámetro  $\theta$ . El valor  $1-\alpha$  se denomina nivel de confianza. Por lo tanto, nunca se puede estar seguro de que el resultado de la muestra es representativo, pero sí se puede confiar en que esta condición se alcanza con una probabilidad alta.

A partir de una muestra seleccionada mediante un método estadístico de muestreo, se estiman las características poblacionales con un error cuantificable y controlable. Las estimaciones se hacen con funciones matemáticas de la muestra denominadas estimadores. Los

errores se cuantifican mediante varianzas, desviaciones típicas o errores cuadráticos medios de los estimadores.

El estimador es un estadístico función de los valores que toma una variable  $X$  sobre los elementos del espacio muestral. En el muestreo, si el tamaño de la muestra es más pequeño que el tamaño de la población, se puede extraer dos o más muestras de la misma población. Asimismo cada individuo analizado dentro de cada muestra se denomina unidad de análisis.

Planteada la estrategia de obtención de datos, surgen dos preguntas: ¿Cómo elegir la muestra de residuos? y ¿Cómo extrapolar a la población entera los resultados que se observaron sobre la muestra? La respuesta a estos interrogantes es lo que se pretende en este apartado.

### 3.4.2. Selección de la muestra y cálculo de estimadores

Los datos de composición de RCD se proponen obtener directamente de muestreo de RCD realizado sobre los contenedores utilizados para su almacenamiento en obras civiles. La variable de interés  $X$  en este caso es “t ó m<sup>3</sup> de RCD” y su precisión depende del tamaño de la muestra y de la varianza de la variable sobre la población (Pérez, 2005).

Existen dos métodos para seleccionar muestras de poblaciones: el muestreo no aleatorio o de juicio y el muestreo aleatorio, que incorpora el azar como recurso en el proceso de selección. Cuando este último cumple con la condición de que todos los elementos de la población tienen alguna oportunidad de ser escogidos en la muestra, si la probabilidad correspondiente a cada sujeto de la población es conocida de antemano, recibe el nombre de muestreo probabilístico.

Con relación a la influencia del tamaño de la muestra sobre la precisión del estimador, puede afirmarse que para obtener la misma precisión sobre la estimación de la media de una variable de interés, se precisa un tamaño de muestra idéntico para un municipio, una provincia o un país, si la varianza de la variable es la misma en todos los niveles mencionados.

Ahora bien, para un mismo tamaño de muestra, la precisión de  $X$ , que suele medirse con el concepto de error de muestreo (desviación típica), será mejor para una población “homogénea” con respecto a la variable de interés (varianza  $\sigma^2$  pequeña), que para una población “heterogénea” (varianza  $\sigma^2$  grande). De ahí, la idea de construir una “partición de la población”, cuando es posible, en subpoblaciones o estratos, dentro de los cuales las unidades de observación son homogéneas respecto a la variable de interés y además las subpoblaciones son heterogéneas entre sí. Este es el fundamento del muestreo aleatorio estratificado, cuya técnica se describe y justifica en los párrafos siguientes.

Según la cantidad de elementos muestrales (individuos bajo estudio) que se han de elegir de cada uno de los estratos, existen tres técnicas de muestreo estratificado:

- Asignación Simple: A cada estrato le corresponde igual número de elementos muestrales, es decir, el tamaño de la muestra es el mismo en todos los estratos.
- Asignación proporcional: el tamaño de la muestra dentro de cada estrato es proporcional al tamaño del estrato dentro de la población.
- Asignación óptima: la muestra recogerá más elementos muestrales de aquellos estratos que tengan más variabilidad. Para ello es necesario un conocimiento previo de la población.

Se adopta y aplica en este trabajo la técnica de asignación proporcional. Para una descripción general del muestreo estratificado y los métodos de inferencia asociados con este procedimiento, suponemos que la población está dividida en  $h$  subpoblaciones o estratos de

tamaños conocidos  $N_1, N_2, \dots, N_h$ , tal que las unidades en cada estrato sean homogéneas respecto a la característica en cuestión.

A cada uno de estos estratos se le asigna una cuota que determina la proporción correspondiente en la muestra total. Dentro de cada estrato se usará la técnica de muestreo aleatorio sin reposición, es decir los elementos muestrales no son devueltos a la población y sólo pueden aparecer una vez en la muestra. De este modo, se obtienen estimaciones separadas para cada estrato.

Se asume la proporcionalidad entre la cantidad de superficie construida y demolida y la cantidad de RCD generados, lo que deriva en la determinación de cuotas de muestreo a partir de los datos estadísticos de superficies construidas/demolidas.

Se tratará el caso de muestreo estratificado proporcional con una y dos variables.

El muestreo estratificado con una variable se realiza considerando una variable categórica auxiliar  $VI$  y se obtiene entonces una partición de la población en  $h$  estratos. Se denotan  $N_L, \dots, N_H$ , los tamaños de las cuotas correspondientes a cada subpoblación, donde la población global es:  $N = \sum N_h$  como se indica en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4** Población estratificada.

Estrato $h$	Cuotas $N_h$
L	Subpoblación $N_L$
M	Subpoblación $N_M$
N	Subpoblación $N_N$
H	Subpoblación $N_H$
Población global	$N = \sum_{h=1}^h N_h$

En la utilización de la variable categórica se supone que si en la base de muestreo, se dispone de una “variable categórica auxiliar  $VI$ ” cuyas categorías, llamadas “estratos”, son homogéneas obtenemos dispersiones bastante débiles dentro de estas categorías (su varianza  $\sigma^2$  pequeña), mejorando la estimación global.

A fin de determinar los tamaños muestrales se propuso realizar un muestreo estratificado de la población de tamaño global  $N = \sum N_h$ , según la variable auxiliar  $VI$  y la variable objetivo  $X$ .

Primeramente se realizó una repartición proporcional al tamaño de los estratos según  $VI$ , tal como se expresa en la Ecuación 3.3.

$$f_h = \frac{n_h}{n} = \frac{N_h}{N}$$

Ec. (3.3)

Siendo:

$f_h$  : tasa de muestreo

$N$  : número total cuotas proporcionales

$N_h$  : número cuotas proporcionales al estrato

$n$  : muestra global

$n_h$  : muestra del estrato

La tasa de muestreo proporcional  $f_h$  es constante para cada estrato.

La muestra así constituida es un “modelo reducido de la población”, que se califica a menudo como “representativa”. Luego se elige la tasa de muestreo deseada, cuyo valor deberá asegurar un mínimo de 30 muestras por estrato, puesto que se considera que la distribución de las medias muestrales responde a una distribución normal (Triola, 2004). Esto implica que generalmente es necesario aplicar a la Ecuación 3.3, una constante de proporcionalidad  $k$ . El tamaño muestral  $n$  y las cuotas  $n_h$  se calculan de acuerdo a la Ecuación 3.4 y Ecuación 3.5.

$$n_h = k \times N_h \tag{Ec. (3.4)}$$

$$n = \sum n_h \tag{Ec. (3.5)}$$

Las mediciones de campo realizadas para cada estrato conducirán a la obtención de las medias y las varianzas, y a la estimación de la variable real  $X$  de la población total, como se señala en la Tabla 3.5 ilustrado para el estrato  $M$ .

**Tabla 3.5** Media y varianza para el estrato M y variable V1

Estrato	Cuota	Nº de muestras	Variable objetivo $X$	
	$N_h$	$n_h$	Media muestral	Varianza muestral
$M$	$N_M$	$n_m$	$\bar{X}_m = \frac{1}{n_m} \sum_{j=1}^{n_m} X_j$	$S_{xm^2} = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n_m} (X_j - \bar{X}_m)^2$

En la segunda estratificación, la variable  $V2$  contiene a la variable de interés  $X$  pero en estratos que identifican las fracciones de residuos en t ó m<sup>3</sup>, denotados  $h_1, h_2, h_3, \dots, h_n$ .

En el caso de la estimación de datos de composición de RCD se implementó el muestreo aleatorio doblemente estratificado. Es decir, se incorpora una segunda variable de estratificación. Así, la primera,  $VI$ , identifica estratos de la población total en municipios ó departamentos  $L, M, N, H, \dots$  de la región estudiada; y la segunda,  $V2$ , se refiere a los constituyentes materiales del flujo de RCD (fracciones).

Para tener en cuenta la estratificación con dos variables  $VI$  y  $V2$ , hay que crear una nueva tabla con tantas filas como estratos de la variable  $V1$  y tantas columnas como estratos de la variable  $V2$ , agregar los tamaños de población  $N_h$  y de las muestras  $n_h$  calculados. Se obtiene una tabla de doble entrada de la repartición de la población y la muestra, según dos variables vinculadas. Se elaboran así, dos tablas de este tipo, una que contiene las medias por estrato (Tabla 3.6) y otra que contiene las varianzas por estrato (Tabla 3.7). Las expresiones para calcular las medias y varianzas mencionadas son las que corresponden a la Ecuación 3.6 y Ecuación 3.7.

$$X_{ih} = \frac{1}{n_h} \sum_{i=1}^{n_h} \bar{X}_{ih} \tag{Ec. (3.6)}$$

$$S_{ih}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_j - \bar{X}_{ih})^2$$

Ec. (3.7)

**Tabla 3.6** Repartición medias muestrales estratificadas por V1 y V2

Variable estratificación V1	Estrato	Cuota	Nº de muestras	Variable de estratificación V2				
		$N_h$	$n_h$	$h_1$	$h_2$	$h_j$	$h_k$	$h_n$
L	$N_L$	$n_l$	$X_{1L}$	$X_{2L}$	$X_{jL}$	$X_{kL}$	$X_{nL}$	
M	$N_M$	$n_m$	$X_{1M}$	$X_{2M}$	$X_{jM}$	$X_{kM}$	$X_{nM}$	
N	$N_N$	$n_n$	$X_{1N}$	$X_{2N}$	$X_{jN}$	$X_{kN}$	$X_{nN}$	
H	$N_H$	$n_h$	$X_{1H}$	$X_{2H}$	$X_{jH}$	$X_{kH}$	$X_{nH}$	

**Tabla 3.7** Repartición desvíos típicos muestrales estratificados por V1 y V2

Variable estratificación V1	Estrato	Cuota	Nº de muestras	Variable de estratificación V2				
		$N_h$	$n_h$	$h_1$	$h_2$	$h_j$	$h_7$	$h_n$
L	$N_L$	$n_l$	$S_{x1L}^2$	$S_{x2L}^2$	$S_{xiL}^2$	$S_{x7L}^2$	$S_{xnL}^2$	
M	$N_M$	$n_m$	$S_{x1M}^2$	$S_{x2M}^2$	$S_{xiM}^2$	$S_{x7M}^2$	$S_{xnM}^2$	
N	$N_N$	$n_n$	$S_{x1N}^2$	$S_{x2N}^2$	$S_{xiN}^2$	$S_{x7N}^2$	$S_{xnN}^2$	
H	$N_H$	$n_h$	$S_{x1H}^2$	$S_{x2H}^2$	$S_{xiH}^2$	$S_{x7H}^2$	$S_{xnH}^2$	
I	$N_I$	$n_i$	$S_{x1I}^2$	$S_{x2I}^2$	$S_{xiI}^2$	$S_{x7I}^2$	$S_{xnI}^2$	

Finalmente se programan las fórmulas de estimaciones globales. La estratificación con dos variables V1 y V2 deriva en una tabla de doble entrada de la partición de la población y la muestra según la Tabla 3.8.

Los valores obtenidos en la Ecuación 3.8 y Ecuación 3.9 son los marginales en las tablas de medias y desvíos típicos reportados en la Tabla 3.8. La suma de los marginales da los valores del total de la población, que es el objetivo del estudio, indicado en dicha tabla para los estratos L y M.

$$\hat{\mu} = \sum \frac{N_h}{N} \bar{X}_{ih}$$

Ec. (3.8)

$$\hat{V}_{(\hat{\mu})} = \sum \frac{N_h^2}{N} \frac{S_{ih}^2}{n_h} (1 - f_h)$$

Ec. (3.9)

Con la media y varianza estimadas se establece el intervalo de confianza del total de RCD en la Ecuación 3.10.

$$\hat{\mu} \mp 1,96 \hat{V}_{(\hat{\mu})}$$

Ec. (3.10)

**Tabla 3.8** Distribución de las estimaciones por estrato

Variable estratificación V1	Estrato	Variable estratificación V2							Total
		$N_h$	$n_h$	$h_1$	$h_2$	$h_i$	$h_7$	$h_8$	
$L$	$N_L$	$n_h$							$\Sigma_L$
$M$	$N_M$	$n_m$							$\Sigma_M$
Total	$N$	$n$	$\Sigma h_1$	$\Sigma h_2$	$\Sigma h_i$	$\Sigma h_7$	$\Sigma h_8$		Estimador global

Los beneficios de la metodología propuesta es que no requiere de  $I_c$  e  $I_d$  desglosados por fracción residual y que los datos son fiables con base estadística.

### 3.4.3. Procedimiento para la obtención de los datos de composición

En el párrafo anterior se seleccionó el método de muestreo y se indicaron las ecuaciones a aplicar. Ahora bien, es necesario definir el procedimiento para su implementación.

Surgió la inquietud de en qué periodo de tiempo se debe tomar la muestra en cada estrato. En este sentido se determinó que dado un tamaño de muestras  $n_h$  para un estrato cualquiera, la selección aleatoria de cada elemento muestral debe realizarse durante un período de tiempo a definir según la región cuente con variaciones estacionales o no, que puedan influir en la generación del RCD. Por ejemplo, en el primer caso se recomienda 1 año, y en días determinados aleatoriamente. En el segundo caso puede tomarse un periodo más breve.

Una vez planificada la toma de elementos muestrales en cada estrato, se procede al trabajo de campo: sobre cada elemento seleccionado se debe obtener el peso del mismo, se lo vuelca sobre una superficie lisa (preferentemente impermeabilizada) y se realiza la segregación en las fracciones que se requiera. Cada fracción debe ser luego pesada separadamente. Este procedimiento se repite con cada elemento muestral. Las ecuaciones indicadas en el punto 3.4.2 permitirán estimar los parámetros estadísticos, media y varianza a través de un intervalo de confianza.

La limitación del procedimiento descrito es el costo en tiempo y recursos que se necesita invertir para poder realizarse, pero siempre hay que tener en cuenta que de una mejor estimación de composición se tendrá una planificación del sistema de gestión más acorde a la realidad.

### 3.5. Caso de aplicación: Gran Mendoza

El área metropolitana o Gran Mendoza consta de una extensión en superficie de 16.700 km<sup>2</sup> y tiene una población cercana a 1.018.470 habitantes. Está integrada por las áreas urbanas de los departamentos de Capital, Godoy Cruz, Guaymallén, Las Heras, Luján de Cuyo y Maipú.

La finalidad que se persigue con la obtención de datos de composición en el caso que se presenta es la planificación integral y regional de los RCD en el área del Gran Mendoza, fundamentalmente contar con los datos para el estudio ambiental, técnico y económico de alternativas de recogida, transporte, reutilización, reciclaje y disposición final. Por este motivo las unidades preferentes son “ton/año” y “tn/percápita/año”.

Existe una tendencia al crecimiento poblacional y a la urbanización en esta área, y por lo tanto una constante demanda de vivienda. Debido a ello, la ejecución de obras de edificación tanto por la actividad inmobiliaria privada, como por la construcción de viviendas sociales, y construcciones no residenciales, han ocasionado un aumento en la generación de RCD en los últimos años y consecuentemente la necesidad de desarrollar prácticas capaces de controlar su destino y de minimizar el impacto ambiental generado (Mercante *et al.* 2009).

Los departamentos que configuran el Gran Mendoza presentan características similares en cuanto a la gestión de los RCD, especialmente en lo que concierne a su disposición final, la cual se realiza en rellenos clandestinos y en vertederos autorizados sin proyecto de explotación. Además, todos se enfrentan a los problemas de la recuperación y recogida informal de los residuos, que luego son abandonados en sitios cercanos al punto de origen con la consecuente generación de áreas degradadas. El sistema de transporte utilizado en la disposición de los RCD es independiente del sistema de recolección de residuos domiciliarios y en condición de actividad privada. Los RCD se depositan sin pagar costo alguno en canteras abandonadas o en sitios recomendados por los municipios.

En el caso de Las Heras, por ejemplo, un relevamiento realizado en toda el área urbana y suburbana del departamento resultó en la identificación de 297 sitios contaminados con RCD (Mercante et al. 2009). El mayor volumen se localiza en un radio entre 3500 a 4000 metros del centro urbano, lo que da cuenta de la importancia de la rentabilidad del transporte en el abandono de los RCD en sitios cercanos a las ciudades.

La normativa respecto de la gestión de RCD es escasa y parcial. Los departamentos de Godoy Cruz y Guaymallén tienen la normativa más completa. Ambos regulan la gestión de RCD a través de las Ordenanzas Municipales N° 5402/07 y N° 7366/07 respectivamente, en la que responsabiliza al productor por el correcto manejo de sus residuos, establece la obligatoriedad de uso de contenedores y crea un registro de transportistas de RCD.

La aplicación del procedimiento para la obtención de los datos de composición en el área metropolitana se realizará sólo en lo referente al número de elementos muestrales necesarios para la determinación de la composición, no habiéndose llevado a la práctica el procedimiento propuesto en su totalidad, debido a que se requiere de un presupuesto al que no se tuvo acceso al momento de realizar este trabajo.

### **3.5.1. Determinación del número de muestras para el cálculo de la composición**

Aplicando la técnica de muestreo expuesta, se estratificó primeramente a la población total por municipios. La población son los RCD generados en todas las obras en construcción, renovación o demolición del área bajo estudio.

Para obtener las cuotas proporcionales a cada municipio, se necesita conocer la cantidad de RCD total generada en un periodo de tiempo, por ejemplo 1 año. Dado que no se cuenta con este dato, se asume una fuerte relación entre la cantidad de superficie construida y demolida y la cantidad de RCD generados, por resultar proporcionales. Se estratifica la población en los seis departamentos que componen el Gran Mendoza.

Se considera como variable categórica VI la “superficie de obras construidas”, medidos en m<sup>2</sup> en cada Municipio del Gran Mendoza. Por lo tanto tendremos seis estratos homogéneos.

Para obtener datos estadísticos de superficies construidas y demolidas en el Gran Mendoza se realizó la consulta de datos en publicaciones de la Dirección de Estadísticas e Investigaciones Económicas de Mendoza (DEIE) y además se mantuvo entrevistas con los responsables de la Dirección de Obras Privadas de los municipios que lo componen. Cabe señalar que son escasos los datos de superficies demolidas por año en cada departamento y están ausentes en las estadísticas oficiales de la DEIE, por lo que para este trabajo y hasta tanto se cuente con datos fiables se considerarán las superficies construidas como base para la determinación del tamaño de la muestra.

Se obtuvieron las cuotas proporcionales a cada uno a partir de la superficie media anual de los datos estadísticos publicados en el periodo 2003-2008 (DEIE, 2011) indicados en la Tabla 3.9.

**Tabla 3.9** Superficie construida en el Gran Mendoza (2003-2008).

Zona y Departamento	Superficie construida (m <sup>2</sup> )					
	Año 2003	Año 2004	Año 2005	Año 2006	Año 2007	Año 2008
Total Provincial	692316	881155	1122124	1044005	1064207	866376
Gran Mendoza	479537	602984	786475	761142	811096	622048
Capital	30332	95773	143619	113703	101956	89286
Godoy Cruz	74946	117747	176097	125709	165106	97955
Guaymallén	128320	100146	122336	175911	215162	172169
Las Heras	47779	67506	92042	106911	74319	67341
Luján de Cuyo	137669	152570	170732	126976	145196	127783
Maipú	60491	69242	81649	111932	109357	67514

Se obtienen las cuotas proporcionales a cada estrato, a partir de la Ecuación 3.11 y tal como se muestra en la Tabla 3.10.

$$N_{L,M,\dots,H} = \frac{m^2 \text{ construidos del municipio } L, M, \dots, H}{m^2 \text{ totales construidos del Gran Mendoza}} \quad \text{Ec. (3.11)}$$

**Tabla 3.10** Cálculo del número de cuotas por estrato

Zona-Departamento	Año 2005		Año 2006		Año 2007		Año 2008	
	m <sup>2</sup>	N <sub>h</sub>						
Total Provincial	1122124	----	1044005	----	1064207	----	866376	-----
Gran Mendoza	786475	100	761142	100	811096	100	622048	100
Capital	143619	18	113703	15	101956	13	89286	14
Godoy Cruz	176097	22	125709	17	165106	20	97955	16
Guaymallén	122336	16	175911	23	215162	27	172169	28
Las Heras	92042	12	106911	14	74319	9	67341	11
Luján de Cuyo	170732	22	126976	17	145196	18	127783	20
Maipú	81649	10	111932	15	109357	13	67514	11

Fuente: Elaboración propia

A los fines del cálculo mostrados en la Tabla 3.10, se ha adoptado como valores para las cuotas proporcionales a cada estrato de la población, N<sub>h</sub>, los valores de los últimos cuatro años de la publicación; 2005, 2006, 2007 y 2008.

La variable objetivo es X (t ó m<sup>3</sup> de RCD), de tamaño global N = Σ N<sub>h</sub>. Para calcular el tamaño de cada muestra se aplicó la Ecuación 3.2, eligiendo una constante de proporcionalidad de un valor k = 3 para asegurar un mínimo de 30 muestras por estrato.

Los resultados se exponen en la Tabla 3.11, siendo para este caso:

- N : número total de cuotas proporcionales a los m<sup>2</sup> de construcción del Gran Mendoza
- N<sub>h</sub> : número de cuotas proporcionales a los m<sup>2</sup> de construcción por Municipio
- n : número total de muestras de medición de la variable real X determinadas en el Gran Mendoza.
- n<sub>h</sub> : número muestras de medición determinadas por Municipio
- n<sub>c</sub> : número de contenedores de RCD equivalente (se consideró 5,5 m<sup>3</sup>/contenedor)

**Tabla 3.11** Cálculo del número de muestras

Estrato	Cuota	Nº de muestras	Contenedores RCD
	$N_{h\text{medio}}$	$n_h [m^3]$	$n_c$
Capital	15	45	8
Godoy Cruz	19	57	10
Guaymallén	24	72	13
Las Heras	11	33	6
Luján de Cuyo	19	57	10
Maipú	12	36	7
Total	N= 100	n= 300	54

Fuente: *Elaboración propia*

El cálculo del tamaño muestral arrojó un valor de 300 m<sup>3</sup>. Una vez obtenidos los datos de campo, se deben realizar los cálculos de media y varianza para cada municipio y para cada fracción de RCD considerada. A partir de estos valores se estimarán los parámetros de la población total.

### 3.6. Conclusiones del Capítulo

Existen varios métodos de caracterización indirecta de RCD a nivel regional en la bibliografía que han sido referidos en este capítulo. Se ha analizado la posibilidad de su aplicación y los datos necesarios para realizar los cálculos correspondientes, llegando a la conclusión que la mayor dificultad se halla en el cálculo de la composición. Esto es debido a la inexistencia de datos fiables de los índices de generación desglosados por fracción residual. En este caso, se aporta en este capítulo un procedimiento que incluye un método directo para determinarla.

El método diseñado se basa en razonamiento estadístico, con aplicación de la técnica de muestreo aleatorio estratificado. La recopilación de las mediciones de campo permite estimar la composición de las fracciones de RCD con un intervalo para un 95% de confianza. Estos resultados de composición, junto al cálculo de la cantidad anual generada, son el punto de partida para planificar alternativas de gestión.

La aplicación de la técnica de muestreo aleatorio estratificado proporcional, con dos variables categóricas, al área del Gran Mendoza arroja un valor de 300 m<sup>3</sup> para el tamaño de la muestra, con lo cual se asegura la “representatividad” de la misma. Este dato queda disponible para las administraciones públicas interesadas en planificar la gestión regional de los RCD.

En la aplicación del método al caso particular de Mendoza se ha utilizado una variable auxiliar referida a las superficies construidas, restando incorporar las que corresponden a demolición, que podrían generar ajustes en la cantidad de elementos muestrales. Esto dependerá de los datos con que se cuente en futuras investigaciones. Por otra parte, no fue posible llevar a cabo la aplicación del procedimiento completo de determinación de la composición por razones de costos.

# Capítulo 4. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN AMBIENTAL DE SISTEMAS DE GESTIÓN DE RCD CON TÉCNICAS DE ACV

---

## **Resumen**

En este capítulo se presenta una metodología de evaluación ambiental de un sistema de gestión integral de residuos de construcción y demolición (SGIRCD) con técnicas de análisis de ciclo de vida. El sistema incluye las etapas de recogida, transporte, tratamiento y disposición final. Se describe e indican las variables y procesos involucrados en cada una, sus límites y alcances, y la relación entre ellas. Se indican los datos y ecuaciones de cálculo para la elaboración de un Inventario de Ciclo de Vida (ICV) de cada etapa. Se describe cómo se realiza la Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV) y la Interpretación de resultados de cada etapa.

### **4.1. Descripción y límites del ciclo de vida de un sistema de gestión de RCD**

El ciclo de vida general de un SGIRCD se compone de distintas etapas, que se muestran en la Figura 4.1. Cada etapa constituye un subsistema del sistema completo, y se describe a continuación:

#### *Recogida*

Los RCD generados en un proceso, se almacenan en contenedores en el sitio de generación o se cargan directamente en camiones. Por lo general se almacenan sin hacer ninguna distinción entre los diferentes tipos de materiales y por lo tanto, posteriormente tienen que ser separados en fracciones. En el caso de una recogida selectiva se podría omitir la clasificación posterior. La Figura 4.1 corresponde a una situación de recogida no-selectiva.

#### *Transporte*

Los recipientes y contenedores se recogen en las obras civiles con regularidad y son llevados a plantas de tratamiento o vertido. Este itinerario de transporte es el que podría considerarse principal, pues existen otros itinerarios para algunas fracciones residuales en particular. El 100% de los residuos se trasladan.

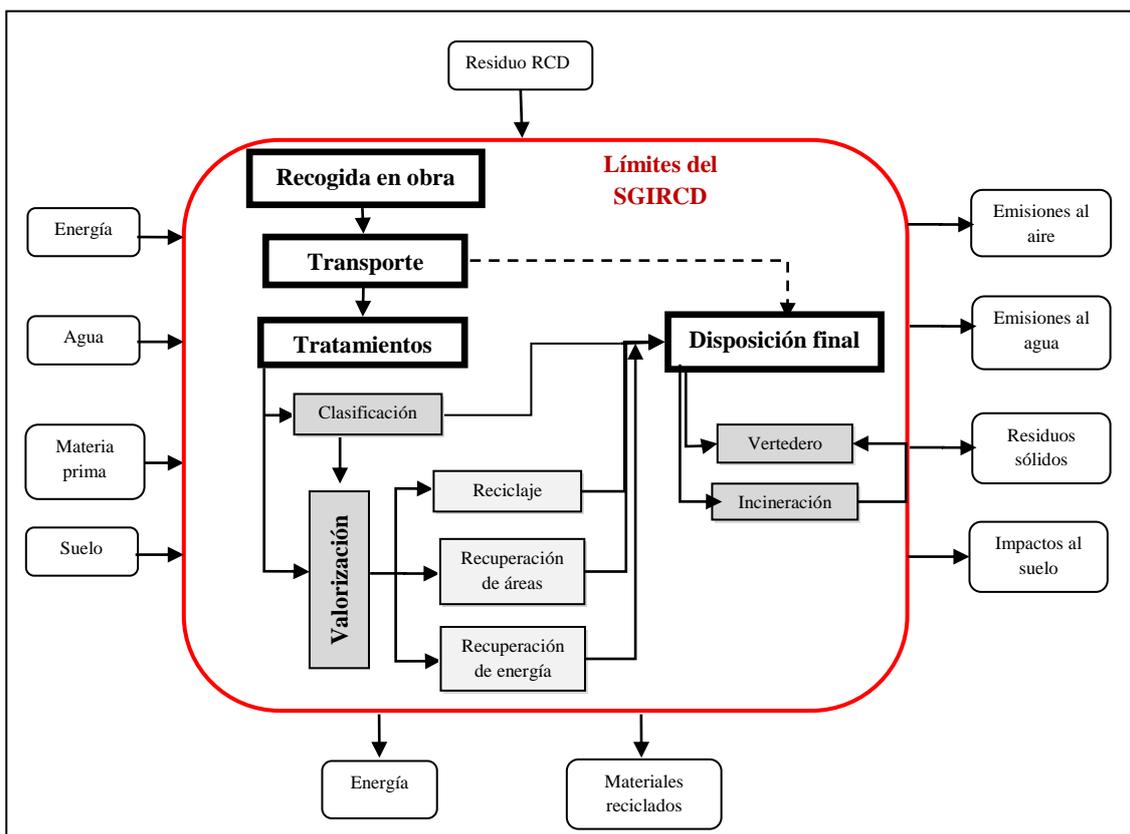
*Tratamiento*

Esta etapa involucra tanto las operaciones de clasificación como las de valorización y se describen en lo que sigue.

- **Clasificación:** En esta etapa, los residuos mezclados se separan en plantas destinadas a tal fin, y se obtienen distintas fracciones (valorizables o residuales). Los materiales valorizables se almacenan en la misma instalación hasta ser derivados a plantas de reproceso específicas, de ahí que también cumplen una función de transferencia. La fracción residual, constituida por los RCD no segregados, constituyen la fracción de rechazo, que se destinará finalmente a vertedero.
- **Valorización.** El proceso de valorización varía según la fracción. Así puede plantearse, por ejemplo, el reciclaje para las fracciones de inertes y no especiales, la recuperación de áreas degradadas para la fracción inerte o la incineración con recuperación de energía para las no especiales.

*Disposición final*

Esta etapa se refiere a la eliminación del residuo mediante su envío a vertedero o a incineración.



**Figura 4.1** Límites del sistema general para el ACV de la gestión de RCD

*Fuente: Elaboración propia*

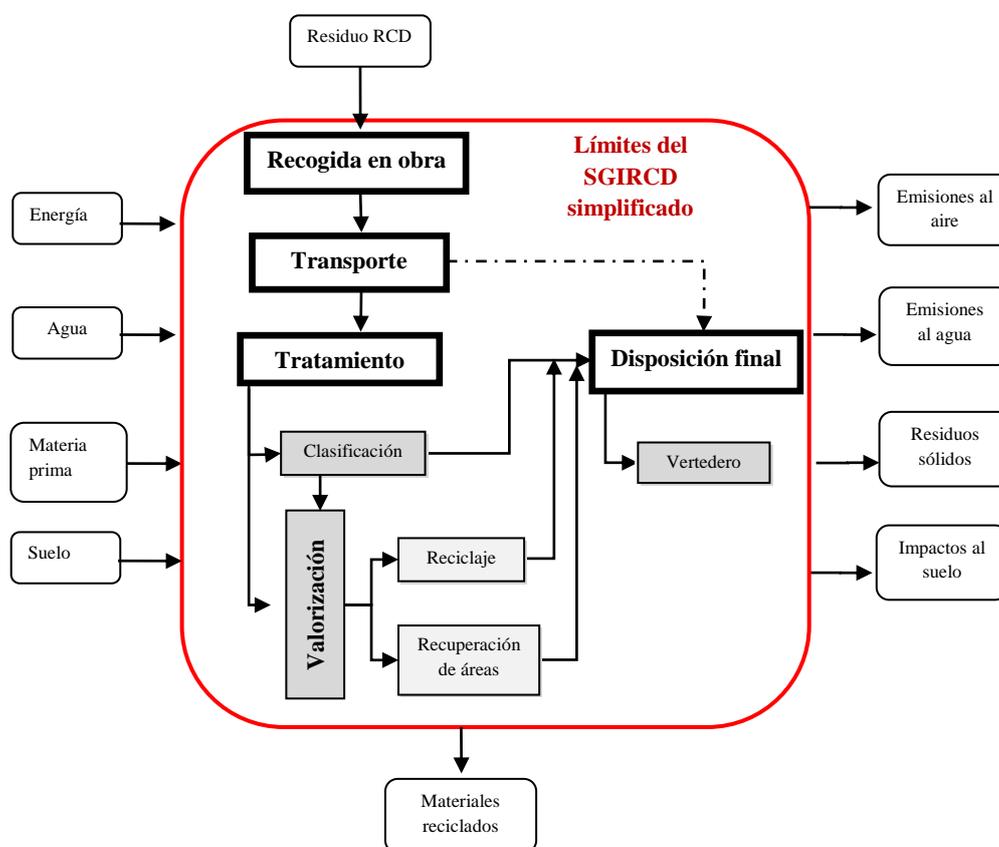
La Figura 4.1 muestra a su vez las posibilidades dentro de las etapas de Tratamiento y Disposición final, y sus relaciones con el resto de las etapas. La línea punteada de color negro indica una opción del sistema de gestión en la cual no se realizan tratamientos, sino que se traslada el RCD a disposición final. Esta acción está prohibida en los países de la Unión Europea, pero suele ser una práctica común en otros.

Otra observación importante es que en el esquema mostrado se asume que los RCD no son clasificados en origen, dado que éste es un esquema general que pretende señalar las etapas principales. Posteriormente, en la evaluación de cada etapa, se describirán las variantes y su influencia en la combinación con la etapa subsiguiente. Asimismo se muestra que la disposición final de los residuos (cenizas) resultantes de la incineración con recuperación de energía tienen como única opción el vertido.

Las entradas al sistema se componen de energía (eléctrica o combustible fósil), agua, materia prima y el espacio ocupado (superficie de suelo) en cada etapa. Las salidas son las emisiones al aire, al agua, los residuos sólidos y los impactos al suelo, los materiales reciclados y la energía obtenida de los residuos.

#### 4.1.1. Sistema de gestión de RCD simplificado

La metodología de evaluación ambiental con técnicas de análisis de ciclo de vida se elaboró sobre un SGIRCD simplificado, en el cual no se consideraron las alternativas de tratamientos térmicos. Por lo tanto, quedarán fuera del alcance de este estudio posibles procesos de valorización mediante incineración con o sin recuperación energética. Esto se justifica por corresponder a tecnologías poco usuales en la gestión de los RCD, y porque las fracciones posibles de tratar o eliminar por estos medios son de muy bajo porcentaje en la composición de los RCD. En consecuencia, el sistema bajo análisis quedaría conformado según se esquematiza en la Figura 4.2. La metodología propuesta en este Capítulo se adapta entonces con mayor fidelidad a flujos de RCD que contengan mayoritariamente residuos inertes con porcentajes que varían entre 75%-80% (Ver Figura 1.3 en Capítulo 1).



**Figura 4.2** Límites del sistema simplificado para el ACV de la gestión de RCD  
*Fuente: Elaboración propia*

Dada las características definidas para el sistema de gestión de RCD, y las simplificaciones adoptadas, en lo que sigue se desarrollará la metodología a aplicar para el análisis de las diferentes etapas que conforman un sistema de gestión como el mostrado en la Figura 4.2. La etapa Tratamiento tiene más de una opción, y se analizará cada una por separado.

#### 4.2. Metodología de trabajo

La metodología de trabajo para llevar a cabo el análisis de ciclo de vida de cada etapa (referida como un subsistema del SGIRCD) consiste en cinco actividades que se esquematizan en la Figura 4.3 y se explican a continuación.

- Descripción de cada etapa del sistema de gestión: incluye una caracterización específica de la misma. Se detalla en qué consiste, sus procesos, y las alternativas de su ejecución.
- Definición del objetivo y alcance: se establecen los objetivos del ACV. Se presenta un diagrama de los límites de cada subsistema, sus entradas y salidas en forma cualitativa, y las operaciones unitarias incluidas. Finalmente se define la unidad funcional.
- Inventario de ciclo de vida (ICV): se identifican los datos cuantitativos requeridos para las entradas y salidas. Se establecen las variables intervinientes para constituir el ICV, sus relaciones y dependencia. Se mencionan las posibles fuentes de datos primarias y secundarias. Se vinculan las variables a los procesos unitarios y se establecen criterios de asignación. Como última fase, se relacionan las variables a la unidad funcional.
- Evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV): en esta actividad, siguiendo los requisitos de la metodología de ACV, se establece la caracterización y clasificación de entradas y emisiones en categorías de impacto. Seguidamente se realiza el cálculo de los indicadores de cada categoría de impacto referidos a la unidad funcional y se representan gráficamente.

Es importante señalar que a los fines del desarrollo de la metodología, en la fase de EICV se incluyen seis categorías de impacto correspondientes al método de evaluación del CML2001 (CML, 2001), tal como se indica en la Tabla 4.1, y una categoría de uso del suelo genérica.

**Tabla 4.1** Categorías de impacto probables para el estudio de ACV de un SGIRCD

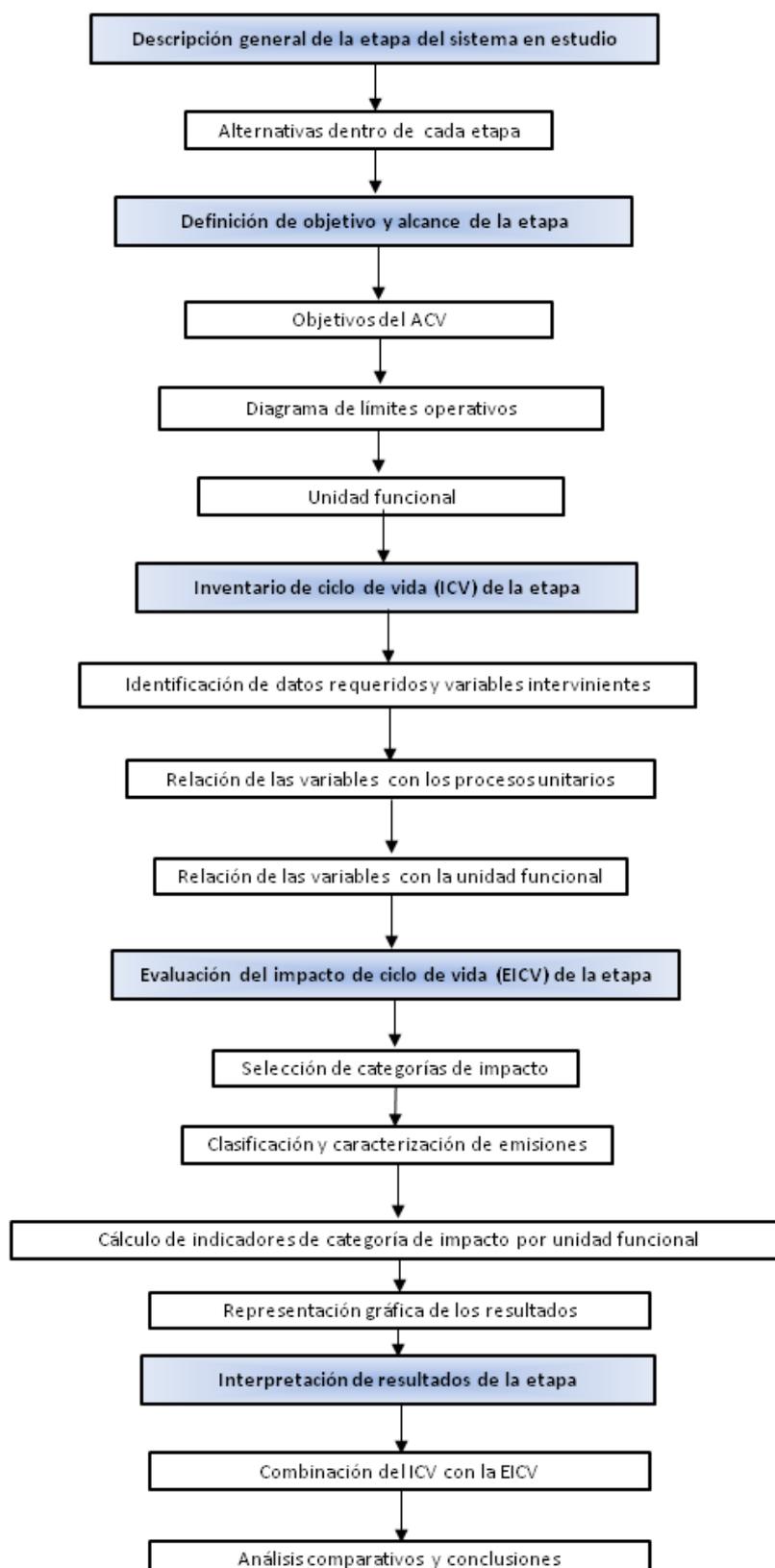
Categoría de impacto	Sigla Indicador	Unidad
Agotamiento de recursos naturales	ADP	kg Sb eq
Calentamiento global	GWP	kg CO <sub>2</sub> eq
Disminución del ozono estratosférico	IODP	kg CFC-11 eq
Formación de foto-oxidantes	IPOCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq
Acidificación	AP	kg SO <sub>2</sub> eq
Eutrofización	AEP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq
Uso del suelo	LUP	ha-año

*Elaboración propia*

Dado que no todas ellas son adecuadas para cualquier sistema, luego, en el Capítulo 5 de esta tesis, y con el fin de no distraer la atención de la elaboración de la metodología de evaluación ambiental de SGIRCD, se describe cada una y se analiza particularmente la pertinencia y adecuación de cada una de estas categorías e indicadores.

- Interpretación de los resultados: en esta instancia se combinan los datos del inventario de ciclo de vida y la fase de evaluación del impacto, teniendo en cuenta el objetivo y el

alcance definido. Se establece en líneas generales los posibles análisis comparativos y las conclusiones a obtener en cada etapa.



**Figura 4.3** Metodología para el ACV de cada etapa del SGIRCD

*Fuente: Elaboración propia*

### 4.3. Entrada de residuos: datos de generación

El primer paso para realizar el análisis de ciclo de vida de la gestión de los residuos de construcción y demolición es definir la cantidad y composición de los generados en el área de estudio. Estos datos surgen de determinaciones locales, para lo cual las metodologías expuestas en el Capítulo 3 pueden ser aplicadas. Si no se cuenta con esta información, hasta tanto sean estimados, puede usarse datos genéricos o por analogía con los obtenidos en otras regiones. Estos serán menos exactos, por lo que hay que tomar ciertos recaudos a la hora de interpretar los resultados, teniendo en cuenta las variables que pueden influir en los mismos.

La Tabla 4.2 indica las fracciones de residuos consideradas en relación a su composición. Las distintas fracciones se han elegido de acuerdo a los materiales más comúnmente encontrados en la composición de los RCD, según distintos países. Los porcentajes pueden diferir según diversas variables, tal como se vio en el Capítulo 3, por lo que es fundamental utilizar la que corresponda al área de estudio.

**Tabla 4.2** Fracciones del flujo de RCD

Tipo	Categorías	Sub- categorías	
Inertes (IN)	Tierras y rocas		
	Pétreos	hormigones, morteros, áridos, concreto asfáltico	
	Cerámicos	ladrillos, revestimientos, losetas, tejas	
No especiales (N-Es)	Madera (MD)	contrachapado, machimbre, puntales, tablas, pallets, madera tratada	
	Vidrio (VD)	vidrio plano	
	Cartón-Papel (CP)	corrugado de embalajes, bolsas de cal y cemento, papel oficina	
	Plásticos (PL)	(PVC) policloruro de vinilo, (PET) polietileno tereftalato, (PS) poliestireno expandido, (PEBD) polietileno de baja densidad, (PEAD) polietileno de alta densidad	
		Metales (MT)	plomo, aluminio, cobre, hierro, acero, bronce
	Yeso (YS)	mortero de yeso, muro seco	
Peligrosos ó especiales (Es)	asfaltos, amianto, pinturas, solventes, envases, aditivos de hormigón, luminarias con mercurio		

Cabe señalar que la gestión de la fracción de residuos peligrosos se gestiona en sistemas independientes y con distinta legislación, por lo que no se incluye en ninguna de las etapas del SGIRCD. Sólo se mencionará en la etapa de Recogida, indicando que se recogen por separado.

### 4.4. ACV de la etapa Recogida

La etapa de Recogida incluye las operaciones de pre-recogida en la obra civil y el almacenamiento transitorio de los mismos. Se distinguen dos tipos de recogida: selectiva y no-selectiva o indiferenciada. Cabe recordar que la adopción de una u otra alternativa en esta primera etapa define las condiciones de las etapas subsecuentes, tal y como se explicó en el apartado 1.4.1 de esta tesis.

En el caso de recogida selectiva, las distintas fracciones de RCD se almacenan por separado en la misma obra civil, por lo que se requieren contenedores individuales para cada una y sectores de acopio para cada material recuperado dentro del predio de la obra. El grado de separación de las fracciones residuales dependerá de la motivación y de la habilidad de los operarios de la construcción, como también del compromiso empresarial para que se apliquen este tipo de medidas (Begum *et al.*, 2009). Algunas empresas constructoras han adoptado

además incentivos económicos y sanciones a sus empleados a fin de lograr sus objetivos de separación de RCD. Por lo tanto, los porcentajes de eficiencia de clasificación de RCD en obras variarán según los factores mencionados. La eficiencia en la clasificación para cada fracción de RCD se puede expresar mediante la Ecuación 4.1.

$$Es_j = \frac{\text{Cantidad real de la fracción de RCD recuperada} * 100}{\text{Cantidad de residuos total de la fracción de RCD}} [\%]$$

Ec. (4.1)

Siendo:

$Es_j$ : Eficiencia de clasificación de la fracción  $j$

A la fecha no se cuenta con datos fiables sobre estos porcentajes, y por otro lado son muy variables según la política de las empresas al respecto.

Otro factor que influye en las condiciones de la recogida es el tipo de actividad de que se trate: obras de construcción nueva, reparación o demolición. En cualquier caso, es posible realizar tanto recogida selectiva como no-selectiva, pero en el caso de la demolición es muy frecuente que los RCD se acopien en forma indiferenciada y además omitan el uso de contenedores. Para tener en cuenta esta situación, se necesitan los datos de composición de cada actividad.

En cuanto al almacenamiento de los RCD en las obras, cabe señalar que si la recogida es selectiva, además de los contenedores se requiere de superficies destinadas a sectores de acopio por cada tipo de material recuperado. Normalmente el acondicionamiento de estas áreas consiste en una construcción provisoria que se desmonta al terminar la obra civil, y sus cargas ambientales asociadas están fuera de los límites del subsistema Recogida por considerarse parte de la infraestructura temporal de las obras. Por el contrario, si la recogida es no-selectiva, los RCD mezclados se almacenan en un único contenedor que es retirado periódicamente o bien en un sector de acopio general a la intemperie.

En algunos países se ha implementado una forma de Recogida llamada en “puntos limpios” o también llamados “ecopuntos”. Estos sitios se encuentran ubicados estratégicamente en las ciudades y tienen como objetivo facilitar la gestión de RCD procedentes de obras menores, cuyo volumen total puede variar entre 1 m<sup>3</sup> -7 m<sup>3</sup> de acuerdo a la reglamentación vigente en cada municipio. En estos casos el generador, propietario de una obra menor, abandona los RCD en el punto limpio más cercano a su domicilio y la administración gubernamental se encarga de su gestión. A los fines del análisis del ciclo de vida del subsistema Recogida, estos RCD de obra menor no se considerarán, como tampoco en las demás etapas del sistema de gestión de RCD, debido a que se gestionan junto a los residuos sólidos domiciliarios.

#### 4.4.1. Objetivos, alcance y unidad funcional de la etapa Recogida

##### *Objetivo*

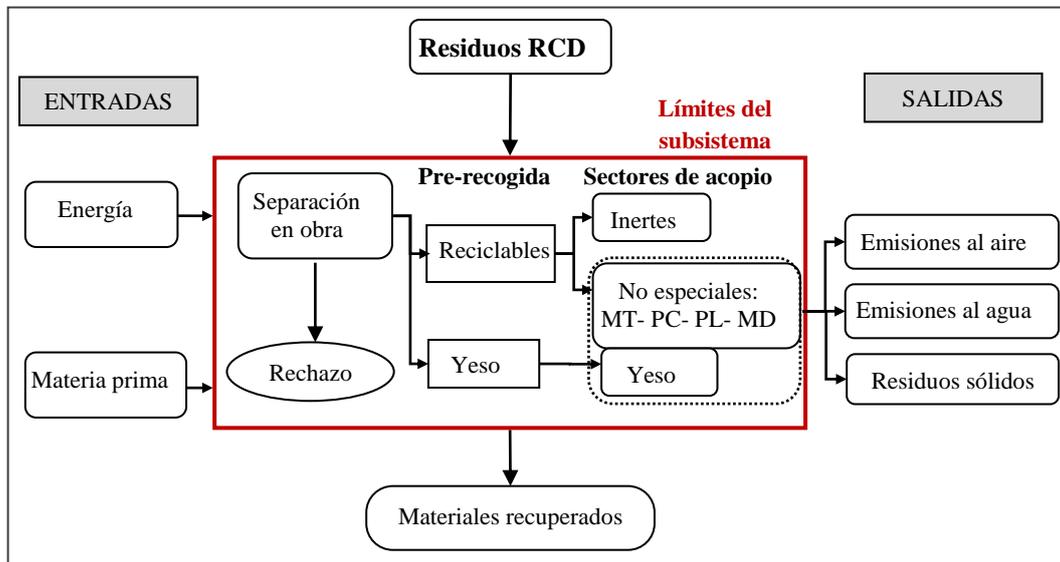
El objetivo es identificar y evaluar las cargas ambientales que se vinculan con la etapa de Recogida y analizar cómo varían esos impactos ambientales según se trate de recogida selectiva o no-selectiva.

##### *Alcance y límites del subsistema*

Las cargas ambientales asociadas a la etapa de Recogida vienen dadas por el consumo de materiales y recursos energéticos por la producción y uso de contenedores.

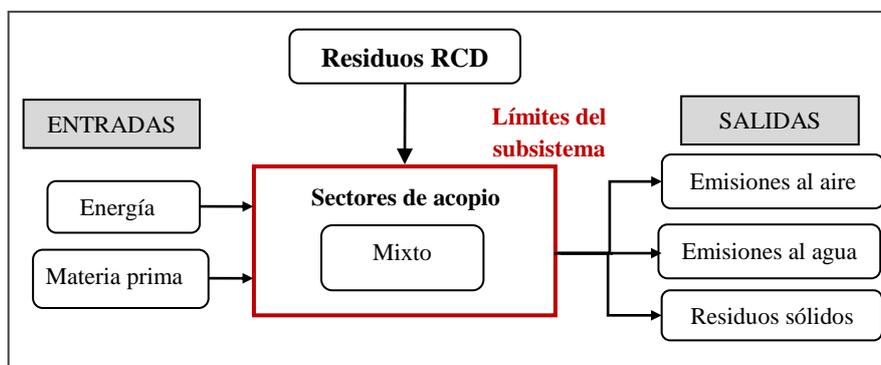
El impacto ambiental debido a los contenedores se debe tanto a la materia prima requerida para producir los diferentes componentes: cuerpo y tapa (polietileno de alta densidad (PEAD); acero ST37, por ejemplo), herrajes (acero, aluminio) y ruedas (acero, goma), como a los procesos de fabricación necesarios (inyección, mecanizado, forjado, soldadura). Otra consideración a realizar es el mantenimiento de los mismos (reparaciones, pintura) que quedan fuera del alcance de este estudio.

La Figura 4.4 y la Figura 4.5 indican los límites del subsistema, entradas y salidas de la etapa estudiada para los dos casos de recogida selectiva y no-selectiva, respectivamente. Para ambos casos, las entradas al subsistema son energía, materia prima y los RCD en el momento que son generados en las obras de construcción o demolición. Las salidas del subsistema son las emisiones al aire, las emisiones al agua, y los residuos sólidos para el caso no-selectivo. En el caso de recogida selectiva se obtienen además fracciones de materiales recuperados. Las cantidades de materiales recuperados y el rechazo serán las entradas para la etapa siguiente (transporte).



**Figura 4.4** Límites del subsistema en recogida selectiva de RCD

Fuente: Elaboración propia



**Figura 4.5** Límites del subsistema en recogida no- selectiva de RCD

Fuente: Elaboración propia

*Unidad Funcional*

La unidad funcional es la recogida de 1t de RCD con la composición que corresponda al área geográfica de estudio o al tipo de obra (construcción o demolición) de la obra civil que se analice. En esta composición se excluyen los residuos peligrosos.

**4.4.2. Datos de inventario de ciclo de vida de la etapa Recogida**

Tal como se describe en el ítem anterior, en la etapa de Recogida se contabilizan las cargas ambientales causadas por los recipientes de recolección utilizados dentro de la obra para almacenar transitoriamente los RCD. El tipo y cantidad de contenedores a tener en cuenta depende según se opte por recogida selectiva o no-selectiva; y en el primer caso además de la fracción de RCD que se recolecte.

Los contenedores de RCD se encuentran en el mercado fabricados de diversos materiales y con varias capacidades. Se necesita entonces realizar un relevamiento en el área de estudio de que se trate para identificar los tipos y tamaños de contenedores con que se cuenta. La Tabla 4.3 indica cuáles son los datos necesarios. Se listan allí por tipo de contenedor ( $C_n$ ) las características técnicas de capacidad ( $V_c$ ), materiales y proceso de fabricación ( $M_n-P_n$ ) y peso del contenedor ( $p_n$ ). Asimismo, dado que estos contenedores tienen una vida útil, se agrega una columna con el número de usos ( $n_n$ ) hasta su reemplazo por uno nuevo. Algunos de estos contenedores se utilizan también en otras etapas del sistema de gestión, tal como la clasificación y reciclaje. Los datos necesarios para configurar el inventario de los contenedores pueden obtenerse directamente a partir de información provista por empresas fabricantes de los mismos y empresas de transporte de RCD, o de bases de datos de inventarios comerciales y/o libres.

**Tabla 4.3** Modelo de planilla para datos de contenedores

Tipo de contenedor	Capacidad $V_c$ ( $m^3$ )	Material-Proceso	Peso (kg)	Número de usos (n)
$C_1$	$V_{c1}$	$M_1-P_1$	$p_1$	$n_1$
$C_2$	$V_{c2}$	$M_2-P_2$	$p_2$	$n_2$
$C_i$	$V_{ci}$	$M_i-P_i$	$p_i$	$n_i$
$C_n$	$V_{cn}$	$M_n-P_n$	$p_n$	$n_n$

El cálculo de la cantidad de contenedores necesarios (N) para cada fracción de residuo o de residuo mixto recogida, y por tonelada, se realiza teniendo en cuenta la densidad aparente de cada fracción de RCD y el número de usos ( $n_i$ ) según lo indicado en la Ecuación 4.2. Los valores de densidad aparente de cada fracción de RCD se pueden adoptar de acuerdo a datos proporcionados por empresas de contenedores o de bibliografía específica (Henry *et. al.*, 1999; Tchobanoglous *et. al.*, 1994). Con los cálculos realizados se obtienen una serie de valores organizados según muestra la Tabla 4.4 .

$$N_{i,j} \left( \frac{N^o \text{ de cont.}}{t} \right) = \frac{1}{\delta_j \left( \frac{t}{m^3} \right) * V_i (m^3) * n_i}$$

Ec. (4.2)

Siendo:

$N_{i,j}$ : número de contenedores por tonelada de RCD para la fracción j

$V_i$ : capacidad del contenedor  $i$

$\delta_j$ : densidad aparente de la fracción residual  $j$

$n_i$ : número de usos del contenedor  $i$

**Tabla 4.4** Modelo de planilla para estimar la cantidad de contenedores de cada fracción de RCD

Fracción de RCD	Densidad aparente (t/m <sup>3</sup> )	Cantidad de contenedores N (N° de cont./t)				
		Tipo de Contenedor				
		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>i</sub>	C <sub>n</sub>
A <sub>1</sub>	$\delta_1$	N <sub>1,1</sub>				
A <sub>2</sub>	$\delta_2$					
A <sub>3</sub>	$\delta_j$				N <sub>i,j</sub>	
A <sub>n</sub>	$\delta_n$					N <sub>n,n</sub>

Las emisiones debidas a la obtención de materia prima y fabricación de los contenedores se pueden obtener de bibliografía o de bases de datos comerciales.

Los consumos de recursos materiales y energéticos, y las emisiones conforman el inventario de ciclo de vida para un contenedor determinado, su determinación lleva a un conjunto de valores que se indican en forma genérica en la Tabla 4.5 .

**Tabla 4.5** Modelo de planilla para el inventario de ciclo de vida de contenedores

Inventario de consumo de recursos y emisiones/contenedor							
Recursos		Emisiones al aire		Emisiones al agua		Residuos sólidos	
Tipo	Cantidad	Tipo	Cantidad	Tipo	Cantidad	Tipo	Cantidad

#### 4.4.3. Evaluación de impacto de ciclo de vida de la etapa Recogida

El inventario de recursos y emisiones por contenedor obtenido en el punto anterior se clasifica y caracteriza en las categorías de impacto que se hayan seleccionado. Los valores de los indicadores obtenidos (Ind. C<sub>i</sub>) cuantifican el impacto ambiental de un contenedor, cualquiera sea su tipo.

Se obtienen los valores de los indicadores tal como se muestra en la Tabla 4.6 , para el caso de los indicadores mencionados en el punto 4.2. No se incluye el indicador de la categoría de uso del suelo por no tener relevancia en el caso de la Recogida en obra.

**Tabla 4.6** Modelo de planilla para los indicadores de impacto para contenedores

Tipo de contenedor	Indicadores de cada categoría de impacto por contenedor Ind.C <sub>i</sub>					
	ADP/ cont.	EP/ cont.	AP/ cont.	GWP/ cont.	IODP/cont.	POCP/cont.
C <sub>1</sub>						
C <sub>2</sub>			Ind. C <sub>i</sub>			
C <sub>i</sub>						
C <sub>m</sub>						

Sin embargo, los valores de los indicadores de cada categoría de impacto deben referirse aún a la unidad funcional considerada en la etapa de recogida (recogida de 1 tonelada de RCD). De

este modo, para cada indicador de impacto el valor referido a 1 t de RCD se obtiene con la Ecuación 4.3.

$$Ind. C_{it} = Ind. C_i \times N_{i,j}$$

Ec. (4.3)

Siendo:

*Ind. C<sub>i,t</sub>*: Indicador de categoría de impacto del contenedor *C<sub>i</sub>* referido a 1 t de RCD

*Ind. C<sub>i</sub>*: Indicador de categoría de impacto para el contenedor *C<sub>i</sub>*

*N<sub>i,j</sub>*: Cantidad de contenedores *C<sub>i</sub>* necesarios para cada fracción *A<sub>j</sub>* de RCD (Tabla 4.2)

En el caso de recogida selectiva, el valor total del indicador de cada categoría de impacto, *Ind. R<sub>t</sub>*, que incluye todos los contenedores *C<sub>i</sub>* que se utilizan para todas las fracciones de la unidad funcional, se calculará como se indica en la Ecuación 4.4. Se asume en esta expresión que cada fracción residual se recoge en un solo tipo de contenedor.

$$Ind. R_{t,s} = \sum Ind. C_{i,t} \times \left[ \sum N_{i,j} \times \frac{\% A_j}{100} \times Es_j \right]$$

Ec. (4.4)

Siendo *Ind. R<sub>t,s</sub>* el valor total del indicador de la etapa de Recogida en obra de tipo selectiva.

En el caso de recogida no selectiva, el cálculo es más sencillo y la expresión se resume a la Ecuación 4.5, ya que en este caso el porcentaje de recolección es de 100 % en un solo tipo de contenedor.

$$Ind. R_{t,ns} = Ind. C_{i,t} \times N_{i,j}$$

Ec. (4.5)

Siendo *Ind. R<sub>t,ns</sub>* el valor total del indicador de la etapa de Recogida en obra de tipo no-selectiva.

En el caso particular de recogida no selectiva, y que se utilice más de un tipo de contenedor, la expresión de cálculo quedaría como en la Ecuación 4.6.

$$Ind. R_{t,ns} = \sum Ind. C_{i,t} \times N_{i,k} \frac{\% M_k}{100}$$

Ec. (4.6)

Siendo:

*M<sub>k</sub>* la proporción de residuo mixto recogida en cada contenedor *C<sub>i</sub>*

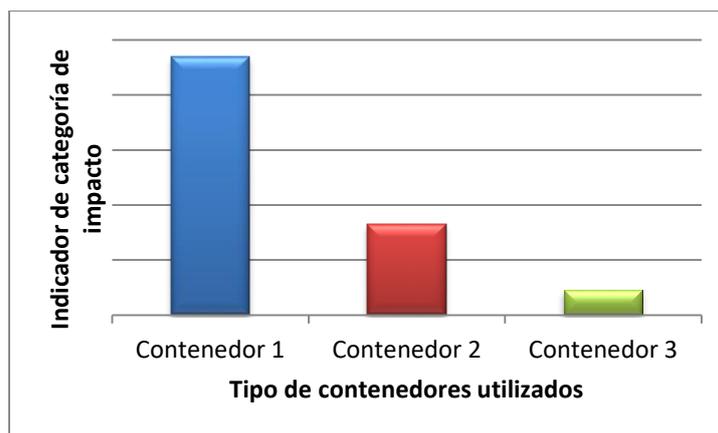
*N<sub>i,k</sub>*: Cantidad de contenedores *C<sub>i</sub>* necesarios para RCD mixto y para la proporción *M<sub>k</sub>*

La Tabla 4.7 ilustra los valores que resultan de los cálculos detallados para el caso de recogida selectiva.

**Tabla 4.7** Modelo de planilla para indicadores de impacto en Recogida (selectiva)

Tipo de contenedor	Fracción de RCD	Indicadores de cada categoría de impacto para la etapa recogida ( $Ind.R_{t,s}$ )					
		ADP/ t	EP/ t	AP/ t	GWP/ t	ODP/t	POCP/t
C <sub>1</sub>	% A <sub>1</sub>						
	% A <sub>2</sub>						
	% A <sub>j</sub>						
	% A <sub>n</sub>						
C <sub>2</sub>	% A <sub>1</sub>						
	% A <sub>2</sub>	Ind. C <sub>i,t</sub> × % A <sub>j</sub> / 100 × E <sub>s<sub>j</sub></sub>					
	% A <sub>j</sub>						
	% A <sub>n</sub>						
C <sub>i</sub>	% A <sub>1</sub>						
	% A <sub>2</sub>						
	% A <sub>j</sub>						
	% A <sub>n</sub>						
C <sub>m</sub>	% A <sub>1</sub>						
	% A <sub>2</sub>						
	% A <sub>j</sub>						
	% A <sub>n</sub>						
$Ind. R_t$		$\sum ADP_i$	$\sum EP_i$	$\sum AP_i$	$\sum GWP_i$	$\sum ODP_i$	$\sum POCP_i$

La Figura 4.6 y Figura 4.7 son ejemplos de representación gráfica de los resultados. Los mismos permiten evaluar las cargas ambientales correspondientes a cada contenedor según la combinación con una fracción residual en cada caso (Figura 4.6 ). Por otra parte, pueden proponerse distintas combinaciones de uso de contenedores-fracciones residuales en caso de recogida selectiva y no-selectiva y evaluar cuál es la más conveniente desde el punto de vista ambiental (Figura 4.7).



**Figura 4.6** Ejemplo de gráfica de EICV de cada contenedor-fracción de RCD en Recogida

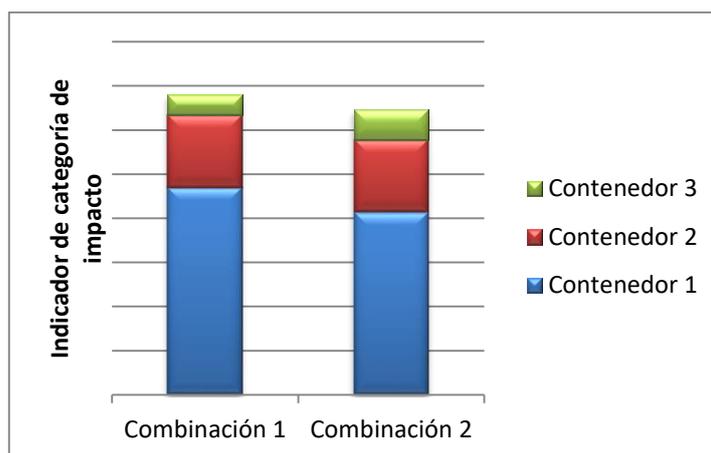


Figura 4.7 Ejemplo de gráfica de EICV en etapa Recogida

#### 4.4.4. Interpretación de resultados de la Recogida

De acuerdo a los contenedores seleccionados durante la etapa de recogida se obtendrán unos valores de indicadores de categoría de impacto  $Ind. R_i$ . Pero además, cada indicador puede desglosarse según la contribución de cada contenedor-fracción. Cabe acotar que la selección de contenedores puede estar condicionada por otros factores distintos del ambiental, por ejemplo, por el espacio disponible en las obras para su depósito, por la facilidad de entrega y retiro vinculada al ingreso del predio, por la frecuencia de recolección, por la disponibilidad de los distintos tipos en el mercado y por el costo del alquiler.

Finalmente, otra aplicación de la EICV de esta etapa es analizar la contribución del subsistema Recogida en obra al total de los impactos del sistema de gestión de RCD.

#### 4.5. ACV de la etapa Transporte

En un SGIRCD se pueden considerar distintos tramos de transporte de RCD según el origen y destino de los mismos. En este estudio, van a utilizarse los siguientes tramos:

- Transporte I: desde obra civil a planta de clasificación, reciclaje o vertedero. Este el tramo principal de transporte porque se traslada el 100% de los RCD.
- Transporte II: desde planta de clasificación a plantas de valorización o vertedero.
- Transporte III: desde planta de valorización a vertedero.

Cada tramo deberá ser contabilizado a fin de considerar las cargas ambientales ocasionadas por el transporte en el total del ciclo de vida del RCD.

El impacto ambiental producido durante el transporte de los residuos se debe a la producción y consumo de combustible de los camiones que los trasladan, una vez recogidos, desde las obras civiles hasta las distintas instalaciones de tratamiento y/o vertido: planta de clasificación, planta de reciclaje o vertedero, entre otras. El gasto de combustible se debe a las operaciones de carga y descarga de contenedores y al traslado propiamente dicho. Este último es directamente proporcional a la distancia recorrida, variable que será diferente en cada localidad geográfica y en cada caso de estudio.

Los vehículos de transporte de RCD pueden ser de distinto tipo y tener diversas capacidades de carga. En general, están los que recogen contenedores y los que llevan la carga al bulto. Al igual que en la etapa de Recogida, el tipo de obra que da origen a los RCD (obras de construcción y demolición) influirá en los medios utilizados para el traslado y por tanto en las cargas del transporte.

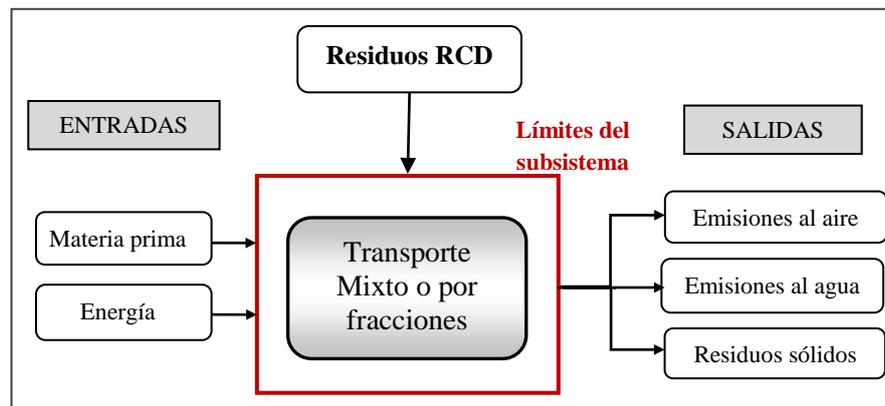
#### 4.5.1. Objetivos, alcance y unidad funcional de la etapa Transporte

##### Objetivo

El objetivo en esta etapa es evaluar las cargas ambientales vinculadas al transporte y analizar como varían los impactos ambientales según el tipo de transporte utilizado y la fracción residual considerada.

##### Alcance y límites del subsistema

La Figura 4.8 indica de manera sencilla los límites del subsistema, sus entradas y salidas. Una cuestión a tener en cuenta es que el consumo de combustible se genera tanto en las operaciones de carga y descarga como en el transporte propiamente dicho. Dependiendo de la accesibilidad a los datos pueden diferenciarse o no ambos consumos.



**Figura 4.8** Límites del subsistema en la etapa de transporte

Fuente: Elaboración propia

##### Unidad funcional

La unidad funcional de esta etapa es el transporte de 1 t.km (transporte de 1 t de RCD en una distancia de 1 km), ya se realice el transporte de residuo mixto (total) o separadamente en las distintas fracciones.

#### 4.5.2. Datos de inventario del ciclo de vida del Transporte

En el inventario del ciclo de vida del transporte se contabilizan los recursos materiales y energéticos, y las emisiones correspondientes al combustible diesel tanto por la obtención de materia prima, fabricación, transporte y distribución hasta las bocas de expendio, como así también las emisiones al aire, al agua y al suelo por su combustión. Otras que podrían ser consideradas son las derivadas de la infraestructura vial para el transporte (rutas y su mantenimiento) y las cargas asociadas al medio de transporte utilizado (camiones), pero en general no se tienen en cuenta por su baja incidencia en el impacto total.

A igual distancia recorrida, el consumo depende de la potencia del motor del vehículo. Por otra parte, es necesario tener en cuenta la relación entre capacidad y tonelaje máximo permitido por la legislación vial en cada región o país. Por ejemplo, la Tabla 4.8 indica los valores límites de carga según la legislación Argentina (DNV, 2012) y de España (RD 2822, 1998), que como puede observarse son muy similares.

Para elaborar el inventario de ciclo de vida se necesita conocer el consumo de los camiones de transporte por cada kilómetro recorrido, vinculado a la potencia del motor. La Tabla 4.9 indica las variables a considerar.

**Tabla 4.8** Valores límites de carga según la legislación argentina y española.

Tipo de transporte s/ potencia (HP)	Argentina				España			
	Nº de ejes	Capacidad (m³)	Total (t)	Neto (t)	Nº de ejes	Capacidad (m³)	Total (t)	Neto (t)
140	1	7	16	10	1	7	18	12
180	2	15	24	16	2	15	24	18
300	3	25	30	25	3	25	30	25

**Tabla 4.9** Modelo de planilla del consumo de combustible según la potencia del vehículo

Tipo de transporte s/ potencia (HP)	C <sub>diesel</sub> Consumo Diesel (l/100 km)
HP <sub>1</sub>	C <sub>diesel1</sub>
HP <sub>2</sub>	C <sub>diesel2</sub>
HP <sub>u</sub>	C <sub>dieselu</sub>
HP <sub>n</sub>	C <sub>dieseln</sub>

En función de los valores de consumo (C<sub>dieselu</sub>) y teniendo en cuenta el volumen de carga del vehículo, su capacidad y el tipo de fracción residual transportada, se calculan los consumos medios de combustible durante el transporte para distintos volúmenes de carga, según la Ecuación 4.7. Los resultados se pueden tabular como se indica en la Tabla 4.10. En todos los casos se debe considerar los topes máximos de carga adoptados de acuerdo a la legislación vigente.

$$Cm_{i,j} = \frac{C_{dieselu} \left(\frac{l}{km}\right) \times f \left(\frac{kg}{l}\right)}{V_i(m^3) \times \delta_j \left(\frac{t}{m^3}\right)} \left[ \frac{kg \text{ diesel}}{t.km} \right]$$

Ec. (4.7)

Siendo:

*C<sub>dieselu</sub>*: Consumo de diesel promedio según la potencia del vehículo

*V<sub>i</sub>*: volumen de la carga

*δ<sub>j</sub>*: densidad aparente de la fracción residual A<sub>j</sub>

*f*: factor de equivalencia del diesel en kg/l

**Tabla 4.10** Modelo de planilla del cálculo del consumo medio de combustible

Fracción de RCD	Volumen de carga (m³)	Densidad aparente (t/m³)	Peso* (t)	Potencia vehículo (HP)	Consumo s/potencia (l diesel/km)	Consumo medio Cm (kg diesel/t.km)
A <sub>1</sub>	V <sub>1</sub>	δ <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	C <sub>dieselP1</sub>	Cm <sub>11</sub>
	V <sub>i</sub>		P <sub>i</sub>	P <sub>u</sub>	C <sub>dieselPu</sub>	Cm <sub>i1</sub>
	V <sub>n</sub>		P <sub>n</sub>	P <sub>n</sub>	C <sub>dieselPn</sub>	Cm <sub>n1</sub>
A <sub>2</sub>	V <sub>1</sub>	δ <sub>2</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	C <sub>dieselP1</sub>	Cm <sub>12</sub>
	V <sub>i</sub>		P <sub>i</sub>	P <sub>3</sub>	C <sub>dieselPu</sub>	Cm <sub>i2</sub>
	V <sub>n</sub>		P <sub>n</sub>	P <sub>u</sub>	C <sub>dieselPn</sub>	Cm <sub>n2</sub>
A <sub>j</sub>	V <sub>1</sub>	δ <sub>j</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	C <sub>dieselP1</sub>	Cm <sub>1j</sub>
	V <sub>i</sub>		P <sub>i</sub>	P <sub>3</sub>	C <sub>dieselP3</sub>	Cm <sub>ij</sub>
	V <sub>n</sub>		P <sub>n</sub>	P <sub>u</sub>	C <sub>dieselPu</sub>	Cm <sub>nj</sub>
A <sub>n</sub>	V <sub>1</sub>	δ <sub>n</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	C <sub>dieselP1</sub>	Cm <sub>1n</sub>
	V <sub>i</sub>		P <sub>i</sub>	P <sub>3</sub>	C <sub>dieselP3</sub>	Cm <sub>in</sub>
	V <sub>n</sub>		P <sub>n</sub>	P <sub>u</sub>	C <sub>dieselPu</sub>	Cm <sub>nn</sub>

\*limitado por la carga máxima permitida s/legislación

Finalmente, los valores útiles para el cálculo se resumen en la Tabla 4.11 , relacionados al volumen de carga y la fracción residual transportada.

**Tabla 4.11** Modelo de planilla del consumo de combustible en Transporte

Cm (kg diesel/t.km)				
Fracción de RCD	Volumen de carga (m <sup>3</sup> )			
	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>i</sub>	V <sub>n</sub>
A <sub>1</sub>	Cm <sub>11</sub>			
A <sub>2</sub>				
A <sub>j</sub>			Cm <sub>i,j</sub>	
A <sub>n</sub>				Cm <sub>nn</sub>

El inventario de entradas y salidas debidas a la fabricación y uso del combustible diesel se pueden obtener de bibliografía o de bases de datos comerciales. Estas conforman el inventario de emisiones para un kilogramo de diesel, que puede representarse con la estructura mostrada en la Tabla 4.12 .

**Tabla 4.12** Modelo de planilla del inventario de ciclo de vida para 1 kg de diesel

Inventario de consumo de recursos y emisiones/kg diesel							
Recursos		Emisiones al aire		Emisiones al agua		Residuos sólidos	
Tipo	Cantidad	Tipo	Cantidad	Tipo	Cantidad	Tipo	Cantidad

### 4.5.3. Evaluación de impacto del ciclo de vida del Transporte

La evaluación del impacto de ciclo de vida de la etapa Transporte se realiza en función de los indicadores correspondientes a la producción y consumo de combustible diesel. Para ello, el inventario de ciclo de vida obtenido en el ítem anterior, se clasifica y caracteriza en diferentes categorías de impacto, cuyos resultados se referirán al impacto ambiental de un kilogramo de diesel. Se obtendrían los valores de los indicadores tal como se muestra en la Tabla 4.13 , para el caso de las seis categorías de impacto seleccionadas en el punto 4.2, omitiendo también en esta ocasión la categoría de uso del suelo.

**Tabla 4.13** Modelo de planilla de indicadores de impacto para combustible diesel

Unidad de combustible	Indicadores de categoría de impacto <i>Ind. diesel</i>					
	ADP / kg diesel	EP/ kg diesel	AP/ kg diesel	GWP/ kg diesel	ODP/ kg diesel	POCP/ kg diesel
1 kg diesel			<i>Ind. diesel</i>			

A los fines de obtener los indicadores de impacto del transporte en un tramo dado, para cada volumen de carga y fracción de RCD transportada, el cálculo se expresa en la Ecuación 4.8.

$$Ind. T_{Vi,t} = Ind. diesel \times \sum C m_{ij} \times \frac{\% A_j}{100} \times E s_j \times d_j$$

Ec. (4.8)

Siendo:

$Ind. T_{vit}$ : Indicador de categoría de impacto de transporte para el volumen de carga  $V_i$  referido a 1 tonelada de RCD transportada

$Cm_{ij}$ : consumo medio de combustible para  $V_i$  y fracción  $A_j$

$d_j$ : distancia a las plantas de tratamiento para cada fracción  $A_j$

La eficiencia en la clasificación de cada fracción es un dato que puede o no estar disponible, por lo que puede adoptarse igual a 1 (uno). Asimismo en el caso de transporte de RCD de tipo mixto  $E_{Sj}$  debe tomarse igual a 1 (uno).

Tratándose de recogida selectiva y suponiendo un tramo de transporte Tipo I, se requiere transporte diferenciado para cada una de las fracciones, por lo tanto el valor de indicador total del transporte por categoría de impacto, considerando todas las fracciones residuales, se expresa en la Ecuación 4.9.

$$Ind. T_t = Ind. diesel \times \left[ \sum_{i=1}^n \left[ \sum C m_{i,j} \times \frac{\% A_j}{100} \times E_{Sj} \times d_j \right] \right]$$

Ec. (4.9)

Siendo en este caso  $d_j$  la distancia de transporte correspondiente a cada fracción  $A_j$ .

La Tabla 4.14 ilustra un modelo de planilla que resume los valores que resultan de los cálculos detallados para el caso de transporte de RCD, que han sido recogidos selectivamente, Tramo I. Del mismo modo se obtienen para los demás tramos del transporte.

**Tabla 4.14** Modelo de planilla de indicadores de impacto en etapa Transporte

Tipo de transporte s/ volumen	Fracción de RCD	Distancia (km)	Indicadores de cada categoría de impacto para la etapa Transporte $Ind. T_{vit}$					
			ADP/ t.km	EP/ t.km	AP/ t.km	GWP/ t.km	ODP/ t.km	POCP/ t.km
$V_1$	% $A_1$	$d_1$						
	% $A_2$	$d_2$						
	% $A_j$	$d_j$						
	% $A_n$	$d_n$						
$V_2$	% $A_1$	$d_1$						
	% $A_2$	$d_2$						
	% $A_j$	$d_j$						
	% $A_n$	$d_n$						
$V_i$	% $A_1$	$d_1$						
	% $A_2$	$d_2$						
	% $A_j$	$d_j$						
	% $A_n$	$d_n$						
$V_n$	% $A_1$	$d_1$						
	% $A_2$	$d_2$						
	% $A_j$	$d_j$						
	% $A_n$	$d_n$						
Totales: $Ind. R_t$			$\sum ADP_i$	$\sum EP_i$	$\sum AP_i$	$\sum GWP_i$	$\sum ODP_i$	$\sum POCP_i$

Los resultados de la EICV pueden graficarse según la Figura 4.9 . En la misma puede verse la contribución de dos combinaciones “tipo de volumen de carga- fracción residual transportada”.

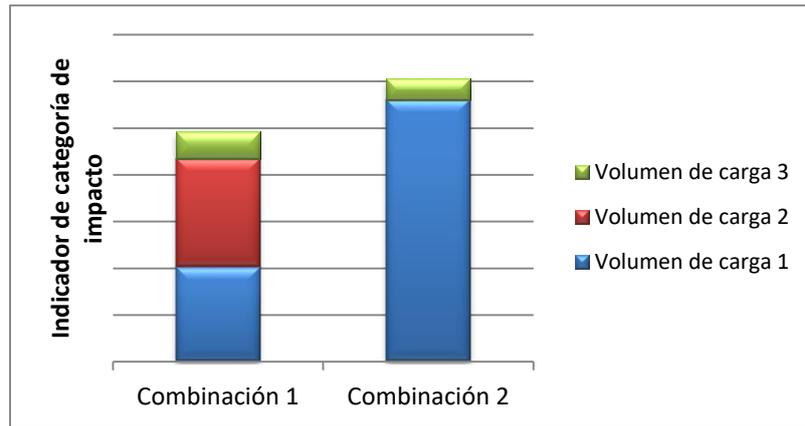


Figura 4.9 Ejemplo de gráfica de EICV en etapa transporte

#### 4.5.4. Interpretación de resultados de la etapa Transporte

Los indicadores de impacto calculados por categoría, y para cada volumen de carga, permiten analizar cómo varían las cargas ambientales del transporte según la combinación del tipo de vehículo utilizado y la fracción residual transportada, y para cada una la influencia de la distancia a la cual se desea o requiere transportar los residuos.

Otra aplicación de la evaluación de esta etapa es analizar la contribución del subsistema Transporte en el total de los impactos del sistema de gestión de RCD.

#### 4.6. ACV de la etapa de Tratamiento: Clasificación de RCD y reproceso de inertes

Dentro del sistema de gestión integral de RCD, la clasificación y el reciclaje son etapas diferentes. Sin embargo, operativamente y en la práctica, estas dos etapas están muy vinculadas entre sí, específicamente en el reproceso de la fracción inerte. Por este motivo se describirán las plantas e instalaciones donde se llevan a cabo ambas operaciones en conjunto y luego se analizará cómo se pueden asignar las cargas ambientales a cada proceso.

Tal como se hizo referencia en el capítulo 1, apartado 1.4.3.1, existen plantas de clasificación de distinto nivel tecnológico, pero con una característica común que es la de incorporar en el mismo sitio el tratamiento de la fracción inerte, a las cuales se referirá en lo que sigue como PCRI (Plantas de Clasificación y Reproceso de Inertes). A los fines de evaluar el ciclo de vida de esta etapa, es necesario inventariar los procesos que se llevan a cabo en estas plantas para lo cual se describen genéricamente según su nivel tecnológico en los apartados siguientes.

##### *Plantas de clasificación y reproceso de inertes de nivel 1 (PCRI-1)*

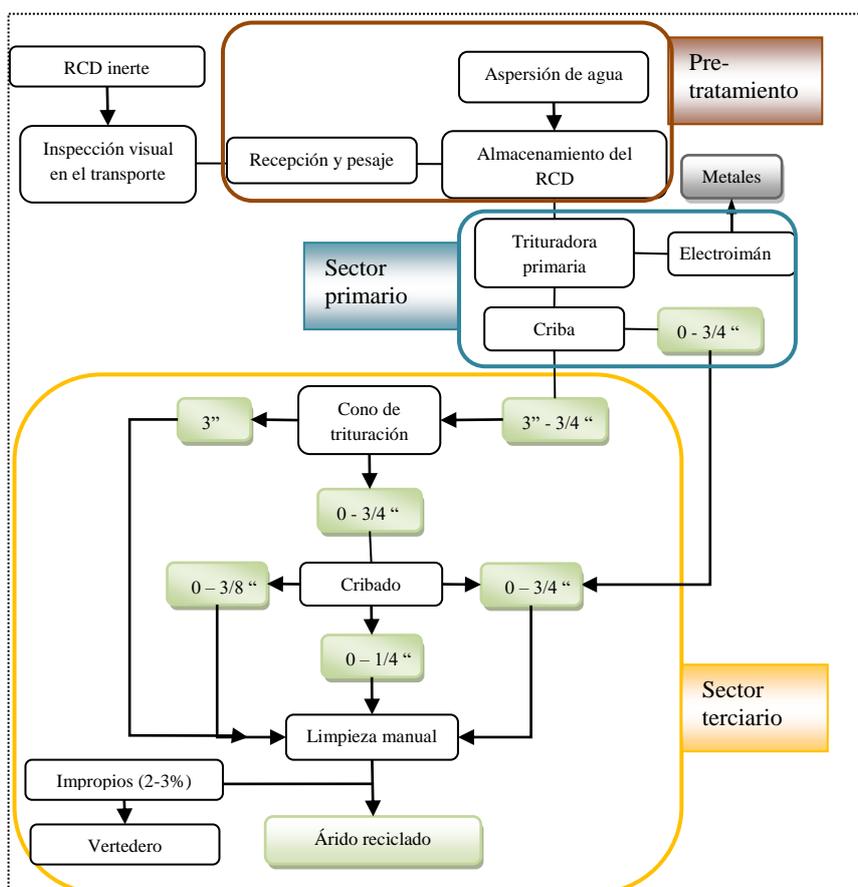
Este tipo de planta realiza principalmente el reproceso del material inerte, ya que no se recibe RCD mezclados, y en el caso que ingresen este tipo de materiales, se designarán como fracción de rechazo. Las trituradoras son de tipo móvil. Sólo clasifican entre metales ferrosos e inertes, y estos últimos por tamaño, y tritura los RCD para que sean utilizados como áridos reciclados. Cuenta con un equipamiento general, que se lista a continuación:

- Máquina excavadora (cargadora) que alimenta el equipo de trituración.
- Equipo de trituración: trituradora de mandíbulas, montada sobre orugas. Puede ser computarizado y manejado a control remoto. Está equipado con imán para separar el acero y un sector de aspersión para capacitación de polvos. Con este equipo se obtienen materiales, en general, desde 3 pulgadas de tamaño máximo hasta finos.

- Equipo de cribado, clasificadora del residuo por tamaño (criba), montado sobre orugas, computarizado y manejado a control remoto. Permite clasificar materiales con distintas curvas granulométricas.
- Cono de trituración.
- Cargadora frontal para el retiro de los materiales reciclados.

Tienen la ventaja de que al ser un equipamiento móvil, permite realizar las operaciones *in situ* en obras de demolición, y en el caso de operar en un sitio determinado se traslada entre los depósitos de RCD, siendo muy versátiles.

La densidad media de los materiales que se reciben es de 1200-1300 kg/m<sup>3</sup> correspondiente al RCD inerte. El RCD se aprovecha en un 97% aproximadamente, ya que posee entre un 2% y 3% de impurezas (papel, cartón, plásticos, textiles) que se disponen luego en vertedero de residuos sólidos domiciliarios. La Figura 4.10 muestra un esquema básico de funcionamiento.



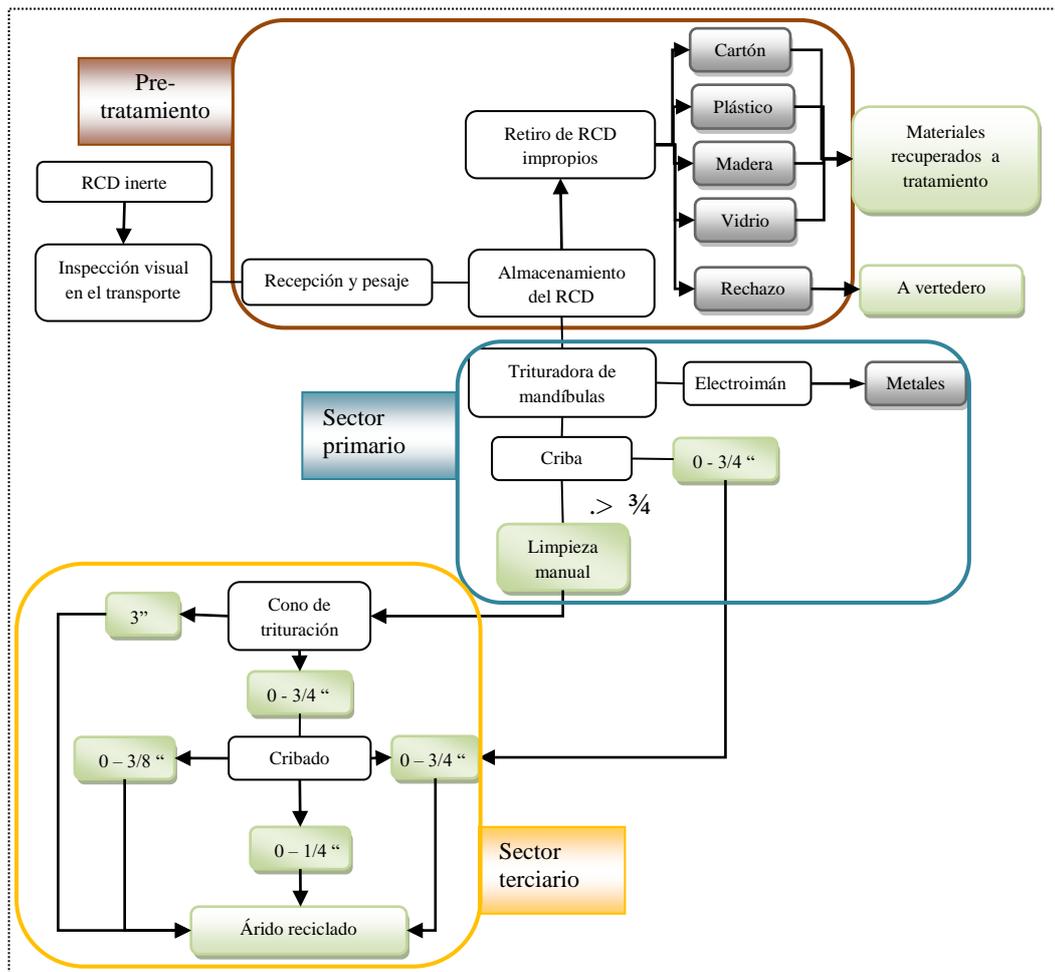
**Figura 4.10** Esquema básico de funcionamiento de una planta PCRI-1  
Fuente: Elaboración propia

#### Plantas de clasificación y reproceso de inertes de nivel 2 (PCRI-2)

En estas instalaciones, el RCD ingresa mezclado. Se descarga en playas hormigonadas, y luego de una separación manual de las fracciones de gran tamaño y distintas a la inerte (plástico, metal, cartón-papel, yeso, vidrio, entre otros). El RCD inerte es triturado y clasificado en planta fija. Suelen funcionar junto a cooperativas de recuperación y comercialización de fracciones residuales reciclables.

La planta de clasificación y reproceso fija consiste en una línea de producción donde se llevan a cabo varios procesos ilustrados en la Figura 4.11 . Cuentan con separación manual para eliminar pequeños trozos de residuos livianos (plásticos, cartón-papel).

El equipamiento en las PCRI-2 es similar al de las PCRI-1, pero las trituradoras son fijas.



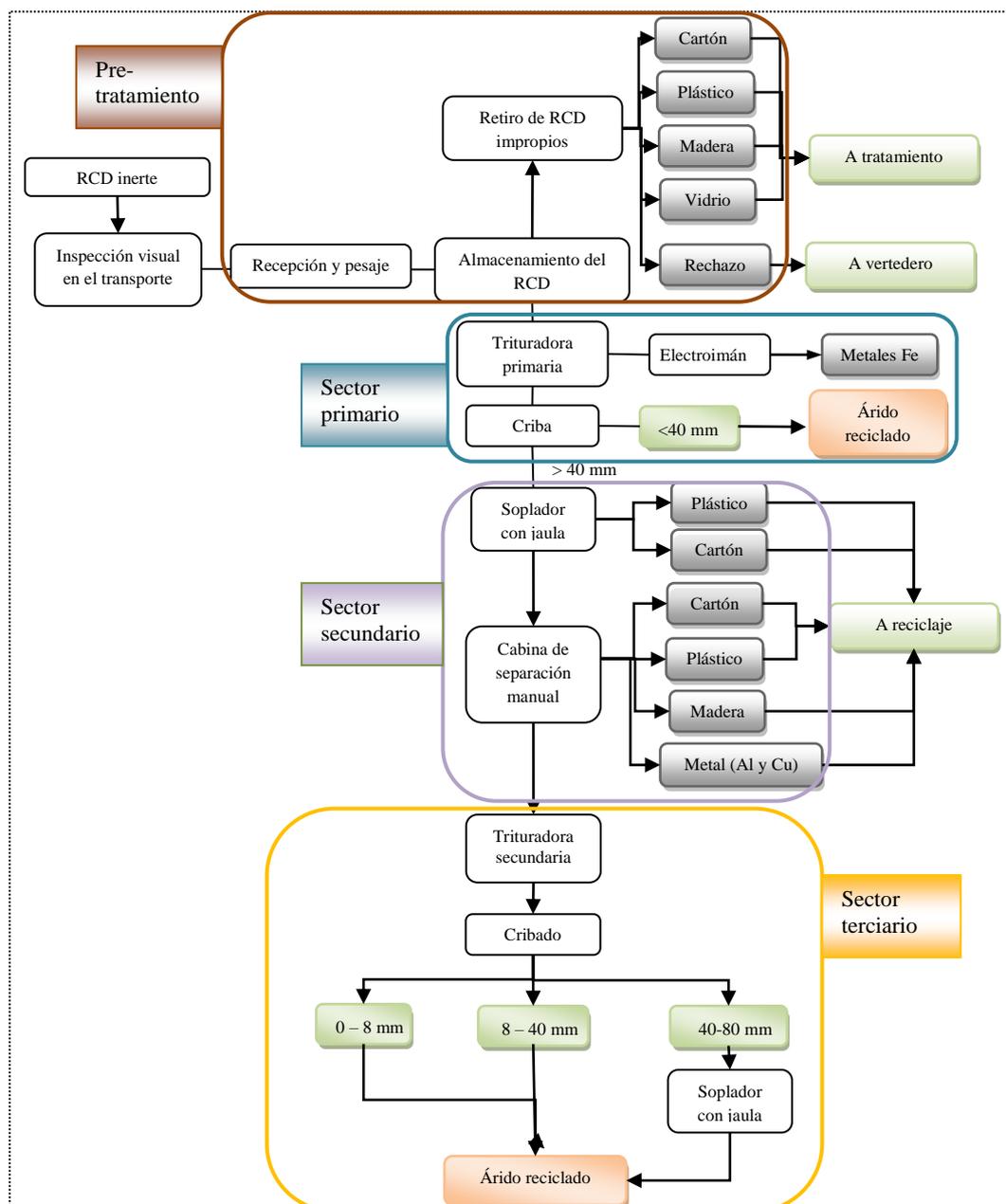
**Figura 4.11** Esquema básico de funcionamiento de una planta PCRI-2

Fuente: Elaboración propia

### Plantas de clasificación y reproceso de inertes de nivel 3 (PCRI-3)

Las PCRI-3 son instalaciones más complejas que las de nivel 1 y 2. La diferencia fundamental radica en la incorporación de procesos mecánicos para la separación de las fracciones diferentes a la inerte y el metal ferroso. Existen además diversos tipos de estas plantas, según la inclusión de distintos procesos unitarios, su capacidad de producción y el tipo de residuo entrante. Por ejemplo, hay PCRI-3 que tratan residuos de hormigón puros y otras que tratan RCD mixto. La Figura 4.13 indica un esquema general de PCRI-3 de RCD mixto, con trituradoras móviles, aunque pueden ser fijas también.

Para el caso del esquema de la Figura 4.12, el equipamiento consta de los siguientes elementos: tolva con alimentador, caja de pre-cribado, cintas de acopio, separador de aire con jaula receptora, banda electroimán, trituradora de impacto, cribas, cinta de acopio de finos, cinta de acopio de arenas, cinta de transferencia de gruesos, separador de aire con jaula receptora, equipo de aspersores de agua para el polvo.



**Figura 4.12** Esquema básico de funcionamiento de una PCRI-3

*Fuente: Elaboración propia*

A continuación se describen las operaciones unitarias genéricas que se realizan en cada uno de los cuatro sectores considerados, según el nivel tecnológico de las plantas:

- **Pre-tratamiento.** En cualquiera de las tecnologías indicadas (nivel 1, 2 o 3) el proceso se inicia en una báscula de recepción en la cual se registra el peso del camión de transporte y se realiza una primera inspección visual, diferenciando si el RCD está compuesto predominantemente de inertes, o si se trata de RCD mezclado. La densidad del material define la calidad del residuo y por tanto su tarifa para el tratamiento. En el primer caso, el residuo inerte pasa al siguiente proceso o sector primario. En el segundo caso, se realiza una limpieza manual del residuo mezclado con ayuda de una retroexcavadora o retropinza a fin de eliminar materiales de gran tamaño, tales como hierros, plásticos, madera o cartón, que puedan dañar el circuito de clasificación o perjudiquen la calidad del material

recuperado. Los materiales rechazados son acopiados para ser valorizados por otro gestor o destinados a vertido. En las plantas de nivel 1 los RCD mezclados son rechazados.

- **Sector primario:** Es una línea fija de tratamiento. En este sector el material entra al circuito de clasificación mecánica por medio de una tolva. Este proceso comienza con una criba cuya abertura varía según las plantas, con un tamaño entre de 300-500 mm. El RCD de mayor tamaño se tritura y luego se somete a cribado previo paso por electroimán que retendrá los metales ferrosos. Una variante a las cribas es el trómel, instalación de tubo circular perforado que clasifica al residuo por tamaño con un límite de 80 mm. Ya sea criba o trómel se separa el material “fino” y se obtiene un producto final. El “fino” puede luego clasificarse en distintas fracciones según sus posibilidades de comercialización y aplicaciones. Estas fracciones pueden requerir una limpieza mecánica final con equipo de soplador y jaula, o túnel de viento, previo a su venta. La fracción gruesa (generalmente con tamaños de granos en el orden de 80-500 mm) se somete a un nuevo proceso en el sector secundario. En la Figura 4.12 esto corresponde a la fracción mayor de 40 mm.
- **Sector secundario.** En este sector se agrega un segundo electroimán, una cabina de selección manual de materiales impropios y separación de materiales ligeros. Existen algunas variantes en cuanto a las operaciones de limpieza del material ligero, que puede realizarse por aire o por agua. En el primer caso se puede plantear un *windshifter*, túnel de viento, o simplemente un soplado con ventilador centrífugo y jaula de retención de ligeros. En el segundo caso, el material entra en un separador hidráulico que consiste en una cuba de agua de nivel constante, donde el material de menor densidad flota en la superficie y es arrastrado hacia una banda de cepillos que lo sacan hacia el contenedor de ligeros. El agua utilizada en estos procesos trabaja en circuitos cerrados a fin de minimizar el consumo.
- **Sector terciario.** El RCD de tamaño grueso ya limpio (por ejemplo, 80-500 mm) se tritura en planta fija o móvil obteniéndose agregado secundario de distintas granulometrías. La mayoría de las instalaciones cuenta con medios de eliminación de polvo que funcionan de forma automática o manual, con sensores que liberan una cortina de agua durante las operaciones de descarga del camión de transporte de los RCD o que humedecen el residuo antes de entrar al circuito de limpieza. Por otra parte, cuentan también con filtros de mangas a fin de retener el material particulado generado durante las operaciones de cribado y limpieza por aire.

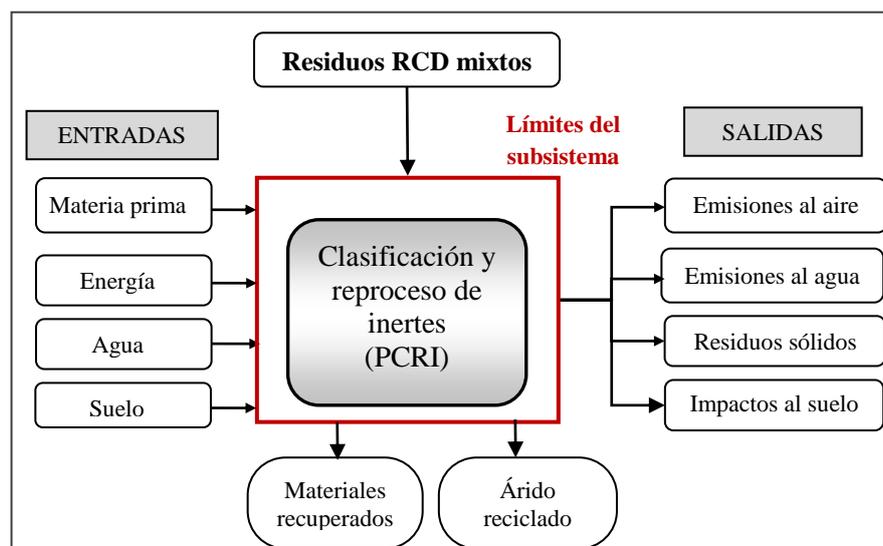
#### **4.6.1. Objetivos, alcance y unidad funcional de la etapa Tratamiento: Clasificación de RCD y reproceso de inertes**

##### *Objetivo*

El objetivo en esta etapa es evaluar las cargas ambientales vinculadas a la clasificación que permitan realizar el análisis de ciclo de vida del subsistema estudiado. Se incluirá en el subsistema el reproceso de inertes por llevarse a cabo dentro del mismo predio y en las mismas instalaciones.

##### *Alcance y límites del subsistema*

La Figura 4.13 muestra un esquema general de las operaciones y procesos que se ejecutan en las PCRI, incluye tanto procedimientos de clasificación y transferencia, como de reproceso de la fracción inerte. Asimismo se ilustran en la misma figura los límites del subsistema.



**Figura 4.13** Límites del subsistema en la etapa de clasificación y reproceso de inertes

*Fuente: Elaboración propia*

#### *Unidad funcional*

La unidad funcional de esta etapa es la clasificación de 1t de RCD y el reproceso de la fracción inerte.

#### **4.6.2. Datos de inventario del Tratamiento: Clasificación de RCD y reproceso de inertes**

Las cargas ambientales asociadas al funcionamiento de las PCRI se originan debido a la producción y uso de combustibles, consumo de agua, y producción y consumo de energía eléctrica. Del mismo modo se contabilizan las salidas, emisiones al aire, efluentes líquidos y los residuos sólidos originados en los procesos involucrados. Otras que podrían ser consideradas son las derivadas de la infraestructura que constituyen las maquinarias y equipos, y su mantenimiento, pero en general no se tienen en cuenta por su baja incidencia en el impacto total (Coelho *et al.*, 2013a).

Un impacto importante a considerar, además de los ya mencionados, es el impacto por uso del suelo por el funcionamiento de las instalaciones de las PCRI. En este caso se requieren distintos datos de inventario según el indicador de impacto utilizado, pero todos ellos requerirán incluir en el análisis el lugar donde se realiza la actividad (región, localidad), el tipo de actividad, el período de tiempo que dura dicha actividad y la superficie ocupada.

La consecución de los datos a partir de los cuales se construye el ICV de esta etapa puede, y es recomendable, se realice en plantas en funcionamiento, para lo cual se propone la siguiente lista de actividades:

- contacto con empresas de PCRI
- visita a las PCRI contactadas: análisis del proceso, cuestionarios sobre el funcionamiento de las instalaciones, identificación de procesos unitarios
- recopilación de datos anuales de procesamiento de RCD y consumos energéticos y de combustible
- asignación de cargas a la unidad funcional
- definición de criterios de asignación
- asignación de cargas a procesos unitarios

- resumen de datos de inventario

A los fines de las entrevistas realizadas en las visitas a las PCRI, se preparó una planilla, que se muestra en la Tabla 4.15 .

**Tabla 4.15** Planilla de datos a relevar en PCRI

<b>DATOS PARA SOLICITAR A PLANTA DE CLASIFICACION Y REPROCESO DE INERTES</b>					
<b>1. Descripción general de la planta.</b>					
a) Procesos					
b) Superficie construida (oficinas, instalaciones varias)					
c) Superficie total del terreno					
d) Días y horario de trabajo					
<b>2. Consumos:</b>					
e) Cantidad de agua y para qué se usa: lts/día o lts/mes					
f) Energía eléctrica: kwh-mes ó kwh/año					
g) Combustible l/mes ó l/año					
<b>3. Potencia instalada y potencia por operación unitaria</b>					
<b>4. Maquinarias utilizadas y características</b>					
Maquinaria					
Datos	Cargadora	Trituradora	Zaranda de clasificación	Camiones uso interno	Otras
Tipo o marca					
Capacidad					
Potencia					
Consumo de combustible					
Consumo de energía					
<b>Observaciones:</b>					
<b>5. Camiones utilizados para el transporte de los RCD a la planta</b>					
	Datos				
Tipo de vehículo	Capacidad (m <sup>3</sup> )	Potencia (HP)	Contenedores		
<b>6. Capacidad de la planta:</b> (m <sup>3</sup> /día ó tn/día)					
<b>7. Producción anual:</b> t RCD tratadas por año:					
<b>8. Entrada y salida de materiales</b>					
¿Se registra los compradores de materiales recuperados de cada fracción?					
¿Funciona la planta como planta de transferencia?					
<b>9. Planimetría de las instalaciones o esquema de distribución de los procesos</b>					
<b>10. Granulometrías obtenidas del reproceso de inertes</b>					
<b>11. Materiales recuperados:</b>					
¿Cuál es el destino de cada fracción recuperada? Si se transporta a otra planta de tratamiento, a qué distancia se encuentra?					
<b>12. Porcentaje de rechazo o residuos de la planta:</b>					
¿Dónde se deposita el rechazo?					
¿A qué distancia se encuentra el vertedero?					
<b>13. Otros comentarios</b>					

Fuente: Elaboración propia

Los datos de inventario referidos a los consumos de combustible, energía eléctrica y agua se pueden obtener en forma directa en instalaciones PCRI, como se explicó en los párrafos precedentes, o de bases de datos de inventario comerciales. La Tabla 4.16 resume los datos de inventario necesarios para PCRI en cuanto a categorías de impacto convencionales y la de uso del suelo.

**Tabla 4.16** Modelo de planilla de datos de consumo del inventario de PCRI

Ítem de consumo	Unidad
Combustible diesel	(l/t)
Energía eléctrica	(kWh/t)
Agua	(l/t)
Superficie ocupada	(ha)

*Fuente: Elaboración propia*

Dado que las PCRI cuentan con varios procesos unitarios puede realizarse una asignación de los consumos por sectores: pre-tratamiento, primario, secundario y terciario, o bien simplificar distribuyendo los consumos totales en un periodo de tiempo determinado para una cantidad de toneladas tratadas en ese mismo periodo.

La asignación de los consumos por sectores permite identificar puntos críticos del proceso total y proponer mejoras en el perfil ambiental de las plantas. En este caso, se necesita establecer criterios de asignación. Para el consumo eléctrico se propone considerar la proporcionalidad entre el consumo y la potencia de los equipos de cada sector, asumiendo que las máquinas operan períodos de tiempo similares, y el funcionamiento es continuo. En el consumo de combustible la asignación puede quedar determinada en función de la potencia de las máquinas móviles, y en función del flujo de material residual tratado en cada sector, si hubiere más de una trituradora. Asimismo, en el consumo de agua utilizada para mitigar el polvo generado o para el lavado de materiales residuales, la asignación por sectores dependerá de si se consiguen los datos para cada uno.

La Tabla 4.17 indica, los datos necesarios para una PCRI-3 que posee todos los sectores mencionados.

**Tabla 4.17** Modelo de planilla para datos de entrada de energía y materiales en PCRI-3

Tipo de Plantas	Proceso	Combustible diesel l/t	Energía eléctrica kWh/t	Agua l/t
PCRI-3	Proceso 1	$C_{d1}$	$E_{e1}$	$C_{a1}$
	Proceso 2	$C_{d2}$	$E_{e2}$	$C_{a2}$
	Proceso i	$C_{di}$	$E_{ei}$	$C_{ai}$
	Proceso n	$C_{dn}$	$E_{en}$	$C_{an}$
	Total	$C_{dt}$	$E_{et}$	$C_{at}$
$C_{dn}$ : Consumo diesel; $E_{en}$ : Consumo energía eléctrica; $C_{an}$ : consumo agua				

*Fuente: Elaboración propia*

Del mismo modo, si hubiere más procesos que hubiere que detallar la misma tabla se adecuará al caso de estudio.

Si se requieren datos diferenciados entre clasificación y reproceso de inertes, hay que llevar un análisis muy detallado de todos los procesos unitarios y no siempre es sencillo. Se proponen los siguientes criterios generales:

- Si se trata de una PCRI-1, los consumos corresponderán exclusivamente al reproceso de inertes, ya que sólo reciben RCD limpios.
- Si se trata de PCRI-2, se tendrán tres sectores:
  - Pre-tratamiento: los consumos corresponden a clasificación
  - Sector primario: los consumos corresponden a reproceso de inertes: trituración y cribado. En la limpieza no se consideran consumos de ningún tipo. La potencia del electroimán se debe contabilizar y asignar a clasificación.

- Sector terciario: los consumos corresponden a reproceso de inertes: trituración y cribado.
- Si se trata de PCRI-3, se tendrán cuatro sectores:
  - Pre-tratamiento: los consumos corresponden a clasificación.
  - Sector primario: los consumos corresponden a reciclaje de inertes: trituración y cribado. La potencia del electroimán se debe contabilizar y asignar a clasificación.
  - Sector secundario: los consumos corresponden a clasificación.
  - Sector terciario: los consumos corresponden a reciclaje de inertes: trituración y cribado. Sin embargo suele existir en estos sectores un equipo de limpieza final que habrá que descontar de los consumos del sector.

Respecto de las salidas del subsistema, se contabilizarán a partir de las emisiones específicas de cada ítem de consumo. En este caso se tendrán emisiones debidas al combustible diesel y a la energía eléctrica. En el caso del diesel ya fue tratado en el apartado 4.5.2, y los resultados fueron resumidos en forma genérica en la Tabla 4.12 .

Con relación al consumo de energía eléctrica es necesario utilizar el mix eléctrico de la región o país de que se trate, esto es la combinación de fuentes de energía primarias (hidráulica, térmica, eólica, nuclear, etc.) que cubren el suministro de un país, La Tabla 4.18 indica un ejemplo en forma genérica y no exhaustiva de la participación de fuentes energéticas en generación eléctrica de un mix eléctrico dado.

**Tabla 4.18** Modelo de planilla de datos de composición del mix eléctrico

Tipo de Generación		Porcentaje (%)
Hidráulica		% HID
Nuclear		% NU
Térmica % TER	Gas Natural	% GN
	Gas oil	% DI
	Carbón	% CA
	Fuel Oil	% FO
Eólica		% EO
Solar		% SO
Total		% 100

*Fuente: Elaboración propia*

Los requerimientos de materia prima y las emisiones de cada una de las fuentes energéticas que se reporten en el mix eléctrico aportarán los datos de inventario adaptado a las condiciones locales. La Tabla 4.19 indica la organización de la información del inventario de energía eléctrica.

**Tabla 4.19** Modelo de planilla de datos de inventario del mix eléctrico

Tipo de energía eléctrica EE	Inventario de consumo de recursos y emisiones/kWh			
	Materia prima-energía	Emisiones al aire	Emisiones al agua	Residuos sólidos
EE <sub>1</sub>				
EE <sub>2</sub>				
EE <sub>k</sub>				
EE <sub>m</sub>				

**4.6.3. Evaluación de impacto de ciclo de vida de la etapa Tratamiento: Clasificación de RCD y reproceso de inertes**

La evaluación del impacto del ciclo de vida de la etapa de clasificación se propone realizarla en función de indicadores de categoría de impacto convencionales correspondientes al combustible diesel y a la energía eléctrica. En cuanto al uso del suelo se tendrá que adoptar un indicador regional adecuado que caracterice las cargas ambientales del área bajo estudio.

En el caso del diesel los indicadores resultantes están señalados genéricamente en la Tabla 4.12 , por lo que será suficiente multiplicar por los consumos correspondientes y se obtiene el impacto total debido a su consumo. La Ecuación 4.10 expresa el cálculo para cada indicador de categoría de impacto en las PCRI.

$$Ind. PCRI_{td} = Ind. diesel \times f \times \sum C_{di}$$

Ec. (4.10)

Donde:

*Ind. PCRI<sub>t</sub>*: Valor de cada indicador de categoría de impacto por tonelada de RCD debido al consumo de combustible diesel

*Ind.diesel*: valor del indicador que corresponde a la categoría de impacto analizada, Tabla 4.12

*C<sub>di</sub>*: Consumo de combustible diesel en cada sector o proceso (l/t)

*f*: factor de equivalencia del diesel en kg/l

Si se obtuvieren datos de consumos parciales en cada sector o proceso unitario, del mismo modo pueden calcularse los indicadores con la Ecuación 4.11.

$$Ind. PCRI_{tdi} = Ind. diesel \times f \times C_{di}$$

Ec. (4.11)

Siendo:

*Ind. PCRI<sub>tdi</sub>*: Valor de cada indicador de categoría de impacto por tonelada de RCD debido al consumo de combustible diesel en un proceso/sector dado

A los fines del cálculo de indicadores de categoría de impacto de la EE, se debe realizar la clasificación y caracterización de emisiones de la Tabla 4.19 . La organización de resultados se indica en la Tabla 4.20 .

**Tabla 4.20** Modelo de planilla de indicadores de impacto para el mix eléctrico

Tipo de EE	Contribución al mix (%)	Indicadores de cada categoría de impacto para cada tipo de EE					
		ADP/kWh	EP/kWh	AP/kWh	GWP/kWh	ODP/kWh	POCP/kWh
EE <sub>1</sub>	% EE <sub>1</sub>						
EE <sub>2</sub>	% EE <sub>2</sub>						
EE <sub>k</sub>	% EE <sub>k</sub>			<i>AP<sub>EEk</sub>/kWh</i>			
EE <sub>m</sub>	% EE <sub>m</sub>						
Total del mix EE	% 100	$\Sigma ADP_i$	$\Sigma EP_i$	$\Sigma AP_i$	$\Sigma GWP_i$	$\Sigma ODP_i$	$\Sigma POCP_i$

Luego el indicador de cada categoría de impacto, total para el mix eléctrico, se calculará con la ecuación 4.12.

$$Ind. EE = \sum_{k=1}^m Ind. EE_k \times \% EE_k$$

Ec. (4.12)

Siendo:

*Ind. EE<sub>k</sub>*: indicador de cada categoría de impacto para un tipo de energía EE<sub>k</sub>

*% EE<sub>k</sub>*: porcentaje relativo a la generación eléctrica de 1 kWh en la región de que se trate

Estos indicadores corresponden a generación de la energía eléctrica en la fuente (producción), por lo que resta corregirlos con los correspondientes porcentajes de pérdida por las líneas de distribución en alta, media y baja tensión, que se designan con *p*. Por ejemplo, en Argentina, se estiman los siguientes valores medios de pérdidas:

- Transporte: El valor de pérdidas es variable según época del año (por la disponibilidad de generación hidráulica o no) y según el estado de demanda. De todos modos, un valor medio razonable es del 2,7% a 2,9% respecto de la energía generada (Andreoni, 2010).
- Distribución: pérdidas en el sistema de alta tensión (redes de 220, 132 y 66kV y estaciones AT/MT) 2,9%; pérdidas en redes de media tensión (13,2 kV) 1,6%, pérdidas en transformadores MT/BT: 1,1%; pérdidas en redes de baja tensión: 1,9% y pérdidas en acometidas y medidores: 0,3% (Andreoni, 2010).

La expresión final del indicador de EE para la PCRI se calculará con la Ecuación 4.13.

$$Ind. PCRI_{tEE} = Ind. EE \times p \times \sum E_{ei}$$

Ec. (4.13)

Siendo:

*Ind. PCRI<sub>tEE</sub>*: Valor de cada indicador de categoría de impacto por tonelada de RCD debido al consumo de energía

*Ind. EE*: valor del indicador que corresponde a la categoría de impacto analizada, Tabla 4.20

*E<sub>ei</sub>*: Consumo de energía en cada sector o proceso (kWh/t)

*p*: factor de pérdida de las líneas de distribución de la EE

Del mismo modo para cada sector de la PCRI puede calcularse el indicador individual con la Ecuación 4.14.

$$Ind. Sector PCRI_{tEEi} = Ind. EE \times p \times E_{ei}$$

Ec. (4.14)

Siendo:

$Ind. Sector PCRI_{tEEi}$ : Valor de cada indicador de categoría de impacto por tonelada de RCD debido al consumo de EE en un sector dado

Por lo tanto el indicador de categoría de impacto total por el funcionamiento de un sector de la PCRI se obtiene por suma de ambos indicadores correspondientes a consumo de combustible y energía, resultando la Ecuación 4.15.

$$Ind. Sector PCRI_{ti} = Ind. diesel \times f \times C_{di} + Ind. EE \times p \times E_{ei} \tag{Ec. (4.15)}$$

Siendo:

$Ind. Sector PCRI_{ti}$ : Valor del indicador de categoría de impacto por tonelada de RCD debido al consumo de diesel y EE en un sector dado

La Tabla 4.21 indica genéricamente los indicadores de categoría de impacto totales que se obtendrían, incluido el indicador de la categoría de uso del suelo (LUP, *Land Use Potential*).

**Tabla 4.21** Modelo de planilla de indicadores de impacto para las PCRI

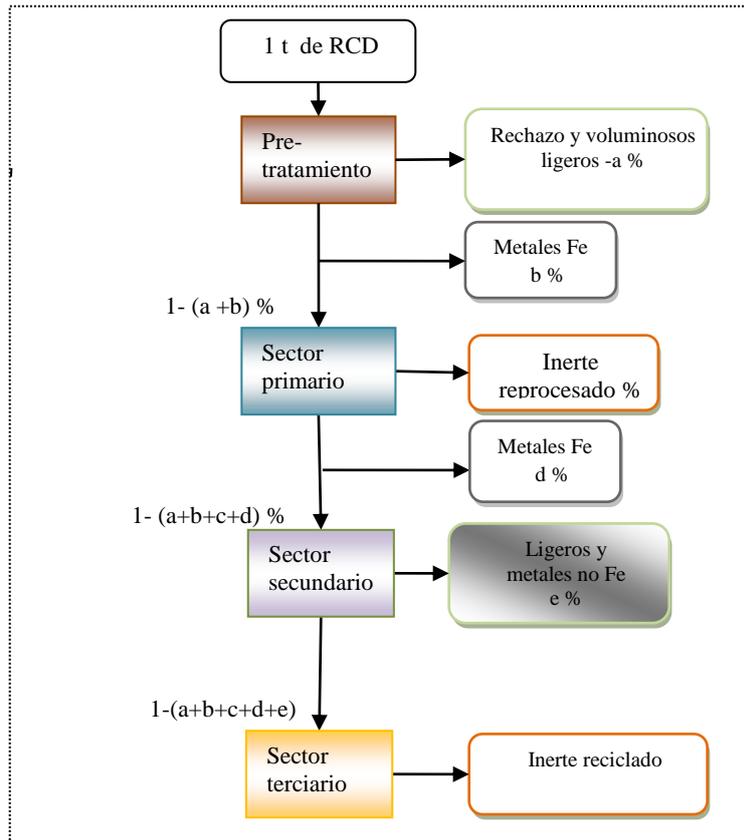
Sector de la PCTI	Indicadores de cada categoría de impacto para cada sector $Ind. Sector PCRI_{ti}$						
	ADP/t	EP/t	AP/t	GWP/t	ODP/t	POCP/t	LUP/t
Pre-tratamiento							
Primario							
Secundario							
Terciario							
Total	$\Sigma ADP_i$	$\Sigma EP_i$	$\Sigma AP_i$	$\Sigma GWP_i$	$\Sigma ODP_i$	$\Sigma POCP_i$	$\Sigma LUP_i$

Ahora bien, la Tabla 4.21 resume los indicadores de categoría de impacto para la PCRI que incluye el reproceso del material inerte.

Estimativamente, pueden asignarse cargas ambientales a los procesos de clasificación y reproceso de inertes del siguiente modo:

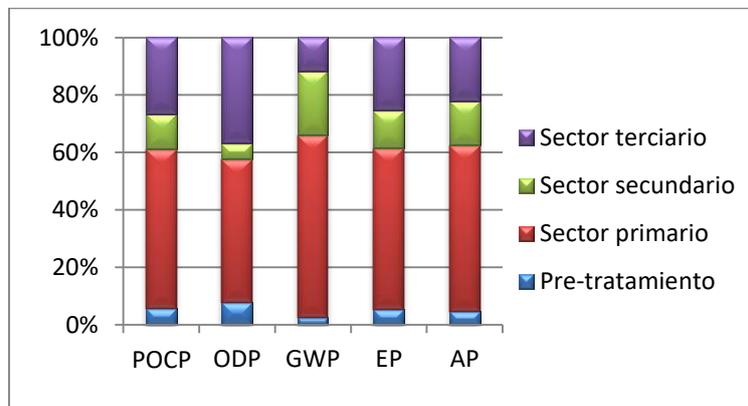
- Pre-tratamiento: corresponden exclusivamente a cargas por clasificación
- Sector primario: corresponden a cargas de reproceso de inertes en su mayoría, pudiendo restarse de los consumos aquellos que corresponden al electroimán.
- Sector secundario: corresponde a cargas de clasificación
- Sector terciario: corresponde a cargas de reproceso de inertes con algunos procesos unitarios de clasificación como el soplador, por ejemplo.

Cabe acotar que los consumos parciales por sectores se refieren a la clasificación y reprocesamiento de 1 t de RCD que ingresa a la PCRI, pero en rigor, después de cada sector hay una disminución del flujo de RCD. Si se pudiera contar con estos datos, podría asignarse cargas ambientales por fracciones residuales, pero a los fines del ACV del sistema de gestión de RCD en su conjunto, esto no tiene aplicación excepto para el reproceso de la fracción inerte si se requiere en los cálculos del reciclaje que es la etapa posterior. Así, el esquema de la Figura 4.14 indica cómo y en qué fracciones el flujo de RCD va disminuyendo su cantidad a través de la línea de producción.



**Figura 4.14** Esquema del flujo de RCD en una PCRI  
Fuente: elaboración propia

La Figura 4.15 indica la comparativa de cinco categorías de impacto para una PCRI-3 representando gráficamente un ejemplo de resultados obtenidos.



**Figura 4.15** Ejemplo de gráfica del perfil ambiental de una PCRI

#### 4.6.4. Interpretación de resultados de la etapa Tratamiento: Clasificación de RCD y reproceso de inertes

Los indicadores de categoría de impactos seleccionados y calculados para las PCRI pueden ser analizados en forma global o por sectores. En la Figura 4.15, se muestran resultados por sectores que permiten analizar la contribución de cada sector a cada categoría analizada, cómo se distribuye el impacto ambiental total en los sectores bajo estudio y cuál o cuáles son los puntos críticos de las PCRI en cuanto al impacto ambiental generado.

En cuanto a la etapa de Clasificación, puede evaluarse su contribución dentro del perfil ambiental total de la PCRI, como así también la incorporación/exclusión de nuevos procesos unitarios de limpieza en pos de una mejor calidad de árido reprocesado. Otro dato que puede aportar el perfil de la etapa de Clasificación es la contribución relativa del combustible diesel y de la energía eléctrica, al total del impacto de cada categoría y analizar variaciones en función de utilizar y optimizar una u otra fuente de alimentación en los procesos unitarios que lo permitan.

Finalmente, los impactos de esta etapa pueden agregarse a los del sistema de gestión integral de RCD y permite evaluar la contribución del subsistema Clasificación al total de los impactos del SGIRCD.

#### **4.7. ACV de la etapa de Tratamiento: Reciclaje**

El reciclaje es una alternativa de tratamiento y valorización dentro del SIGRCD. Cualquier actividad de reciclaje influye sobre el ambiente, tanto por el consumo de recursos y las emisiones para llevarla a cabo, como por la sustitución de la materia prima que les da origen. Las características de este proceso dependen de la fracción residual considerada que se haya segregado en obra civil o en plantas de clasificación.

La fracción inerte tras un proceso de trituración y cribado, tal como se ha descrito en el apartado 4.6, permite obtener áridos reciclados de diferente granulometría. Particularmente, en el caso de algunas demoliciones suele reciclarse en el sitio de la demolición con plantas móviles y aprovecharse el material reciclado en el mismo terreno a modo de relleno. Otro tanto ocurre con las obras viales y el reciclado de asfalto, donde el material triturado se incorpora en nuevas mezclas de concreto asfáltico en la misma obra. Por lo tanto, cada caso particular tendrá consideraciones especiales a tener en cuenta.

En tanto, la valorización del resto de fracciones se realiza en plantas específicas de reprocesamiento de cada material recuperado (cartón/papel, plástico, madera, vidrio y metal, entre otras). En todos los casos, para las fracciones mencionadas, se obtiene un material reciclado que sustituye al material virgen, y que en el estudio de ACV se considerará como carga evitada.

Cabe mencionar que la evaluación ambiental de cualquier actividad de reciclaje se verá influenciada tanto por los porcentajes de eficiencia en la clasificación (ya sea en origen o en planta) como por la eficiencia durante el reprocesamiento (representa la pérdida de materiales durante el reproceso).

La eficiencia total puede expresarse según la Ecuación 4.16

$$Er = Es * Ep$$

*Ec. (4.16)*

*Siendo: Er: Eficiencia total (%)*

*Es: Eficiencia de la clasificación de cada fracción residual (%)*

*Ep: Eficiencia del reprocesamiento (%)*

La Tabla 4.22 indica un modelo de planilla para los datos de eficiencia total.

**Tabla 4.22** Modelo de planilla de eficiencia para cada fracción residual

Fracción residual recuperada	Eficiencia de clasificación Es (%)	Eficiencia de reproceso Ep (%)	Eficiencia total Er (%)
A <sub>1</sub>	E <sub>S1</sub>	E <sub>p1</sub>	E <sub>r1</sub>
A <sub>2</sub>	E <sub>S2</sub>	E <sub>p2</sub>	E <sub>r2</sub>
A <sub>j</sub>	E <sub>Sj</sub>	E <sub>pj</sub>	E <sub>rj</sub>
A <sub>n</sub>	E <sub>Sn</sub>	E <sub>pn</sub>	E <sub>rn</sub>

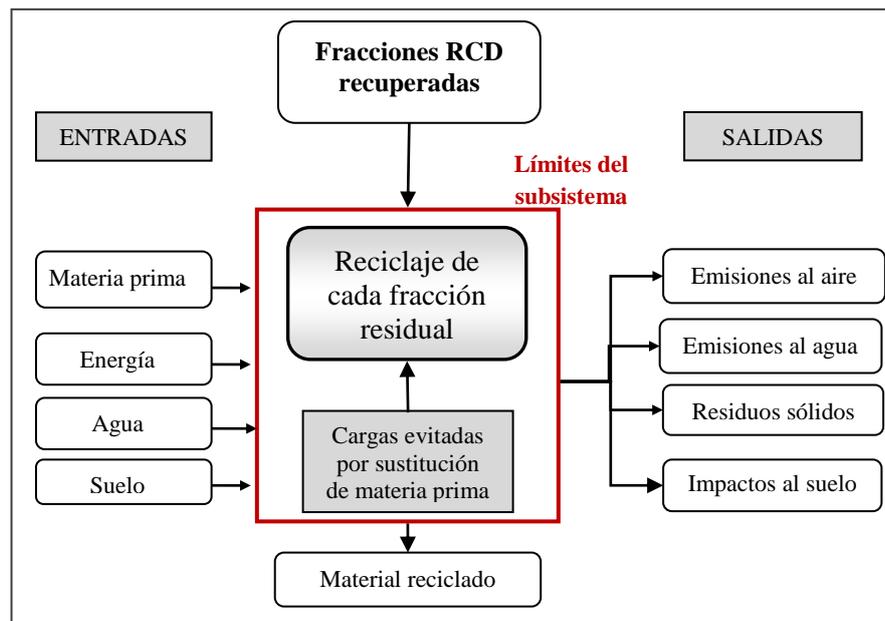
#### 4.7.1. Objetivos, alcance y unidad funcional de la etapa Tratamiento: Reciclaje

##### Objetivo

El objetivo es evaluar las cargas ambientales que se vinculan con la etapa del Reciclaje de las fracciones residuales recuperadas. Asimismo se contabilizan las cargas evitadas por sustitución de material virgen.

##### Alcance y límites del subsistema

La Figura 4.16 ilustra los límites y alcance del subsistema correspondiente a la etapa de reciclaje, cualquiera sea la fracción residual considerada. El reprocesamiento de materiales recuperados hasta generar productos reciclados se incluye dentro de los límites del subsistema.



**Figura 4.16** Límites del subsistema en la etapa de Tratamiento: Reciclaje

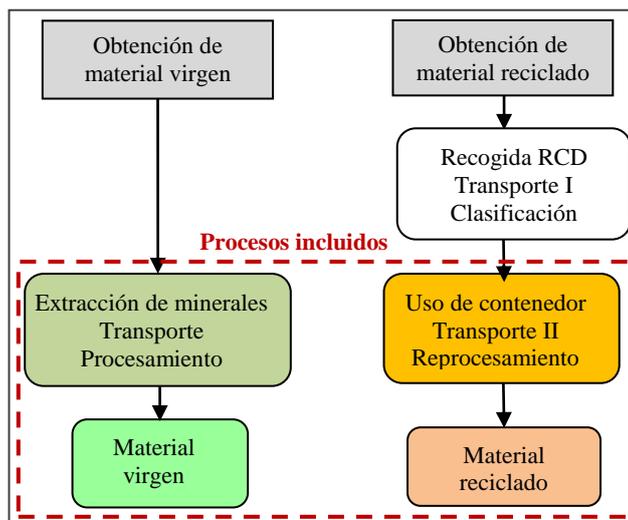
Fuente: Elaboración propia

Las entradas al subsistema son la energía y materia prima necesarias para el reciclaje de las fracciones residuales recuperadas; como salidas se contabilizan las emisiones producidas durante la obtención del material reciclado; y como carga evitada se tiene en cuenta la cantidad equivalente de material virgen que podría sustituir el material reciclado producido.

En general, se asume que el material reciclado tiene las mismas propiedades que el material virgen, pero hay casos en que no lo puede sustituir en igual cantidad. A estos fines se considera una proporción de sustitución que será referida al analizar cada fracción residual. Los procedimientos para determinar las proporciones de sustitución utilizan como la base para la asignación: propiedades físicas (por ejemplo, masa), valor económico (por ejemplo, valor de

mercado del material de desecho o material valorizado en relación al valor de mercado de la materia prima) ó el número de los usos posteriores del material reciclado (Rigamonti *et al.*, 2009).

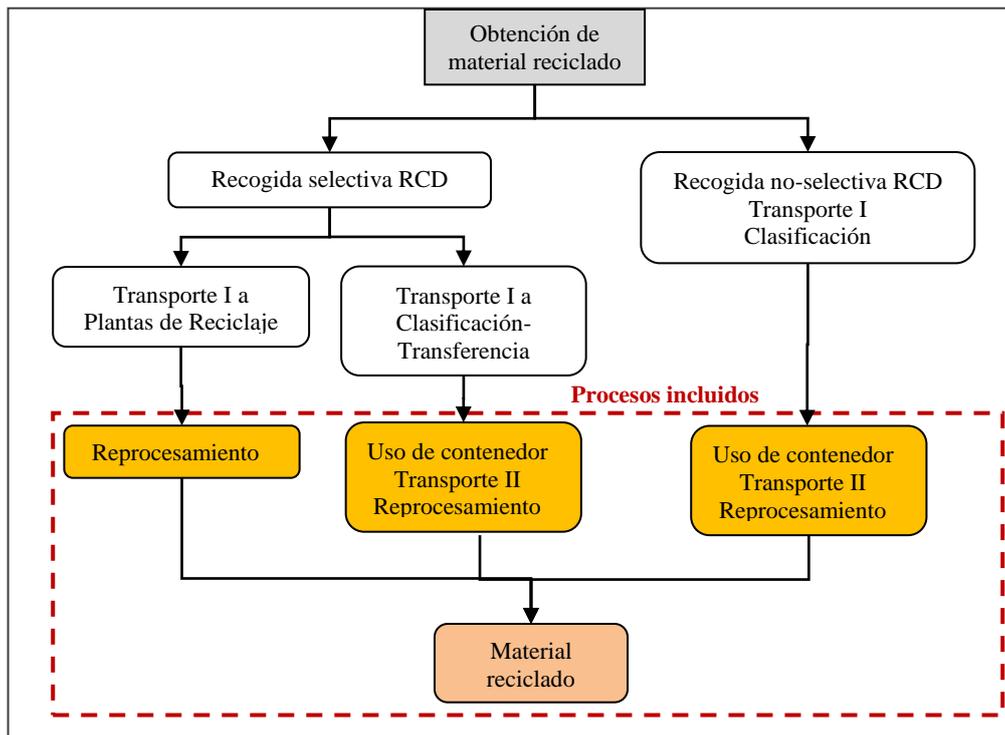
En general, el diagrama de flujo del ciclo de vida de un material virgen y otro reciclado desde la cuna hasta obtener el material producido (virgen o reciclado) se grafica en la Figura 4.17 . Según la misma, en la obtención del material reciclado aparecen los procesos de recogida del RCD, transporte y clasificación. Ahora bien, estos procesos ya fueron considerados dentro del SGIRCD, por lo tanto a efectos de la evaluación de esta etapa como parte de un SGIRCD solo se considerarán el uso del contenedor, el transporte (mencionado como Transporte II) hacia las plantas específicas y el reprocesamiento.



**Figura 4.17** Procesos incluidos en la obtención de material virgen y reciclado  
*Fuente: Elaboración propia*

En el diagrama, en el caso de que el objetivo del estudio fuese la comparación de la obtención de material reciclado versus la obtención de material virgen, independientemente del SGIRCD, habría que considerar el esquema completo. Los cuadros marcados con colores involucran entonces los procesos incluidos en la comparación de las cargas ambientales para la producción de ambos materiales en el caso que se estudia.

Otra consideración importante es que si la recogida en obra civil fue selectiva, se evita la clasificación, y por tanto, también el tramo de Transporte II si las fracciones recuperadas son enviadas directamente a las plantas de reciclaje correspondientes. Sin embargo, puede ocurrir que se trasladen a las plantas de clasificación para su acopio, en el caso que éstas funcionen como planta de transferencia. Por lo dicho, habrá que adecuar los cálculos a cada caso particular. La Figura 4.18 esquematiza las diferentes opciones.



**Figura 4.18** Procesos alternativos incluidos en la obtención de material reciclado

Fuente: Elaboración propia

#### Unidad funcional

La unidad funcional es el reciclado de 1 tonelada de material recuperado, es decir de cada fracción residual separada en origen o en planta de clasificación.

#### 4.7.2. Datos de inventario de la etapa Tratamiento: Reciclaje

Los datos de inventario contabilizados en esta etapa consideran las cargas ambientales debidas al reciclaje y la carga evitada por el ahorro del reemplazo de material virgen para cada fracción. Las fracciones frecuentemente pasibles de reciclaje en el flujo de RCD son: inerte (mezclado, hormigón, asfalto), plástico, vidrio, madera, cartón/papel y metales ferrosos y no-ferrosos.

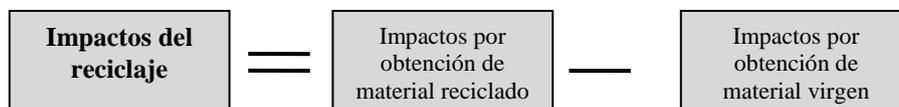
Los datos de inventario correspondientes al proceso de reciclaje contemplan aquéllos referidos al uso de contenedor, transporte y reprocesamiento de los materiales recuperados, con sus variantes, tal como se ilustra en la Figura 4.18. En cuanto a las operaciones de uso de contenedor y transporte, los datos requeridos son los mismos que se analizaron en el apartado 4.4 y 4.5 de este Capítulo. En rigor para el caso de Transporte II hay que aplicar en las cantidades de materiales recuperados los porcentajes de eficiencia de clasificación en las PCRI, tal como se indican en la Tabla 4.22

Las cargas ambientales por el reprocesamiento se atribuyen a la materia prima y energía consumida durante las operaciones de trituración, fusión, tamizado, entre otras, y sus correspondientes emisiones, hasta obtener un producto que sustituya a la materia prima virgen. A cada fracción se debe asociar además un porcentaje de eficiencia tal como se indicó genéricamente en la Tabla 4.22.

En cuanto a los datos de inventario necesarios para cuantificar el producto evitado se deben considerar los consumos de energía y materia prima, y las emisiones por la obtención del

material virgen que dio origen al residuo durante las operaciones de extracción de minerales, transporte y procesamiento.

El resultado total de las cargas ambientales por reciclaje será en cada caso la diferencia entre las cargas por obtención de material reciclado y las que surjan del material virgen, tal como se muestra en la Figura 4.19 .



**Figura 4.19** Impactos del Reciclaje incluida la carga evitada por material virgen

En lo que sigue, se analizará para cada fracción residual los datos de inventario necesarios para la evaluación de esta etapa. En todas, excepto la fracción inerte, pueden intervenir cargas ambientales por uso de contenedores y transporte (Transporte II) que ya fueron explicadas. Por este motivo se detallan solamente los datos de inventario que corresponden a reproceso del material recuperado y a la obtención de material virgen en cada caso.

*Reproceso de la fracción inerte*

En el caso de la fracción residual inerte se obtienen áridos reciclados con distinta composición físico-química según sea el RCD mixto o procedente de fracciones puras de hormigón y/o asfalto. El reproceso del residuo inerte incluye operaciones de trituración y clasificación granulométrica. Los datos incluidos en el cálculo de las cargas ambientales del reprocesamiento de la fracción inerte y del producto evitado se muestran en la Tabla 4.23 .

**Tabla 4.23** Productos evitados y reproceso de la fracción inerte

Productos evitados
Mineral, obtención y clasificación granulométrica de 1 t de grava en cantera
Consumos por reproceso de la fracción inerte
Combustible y energía eléctrica por trituración y clasificación granulométrica de 1 t de inerte residual

Fuente: Elaboración propia

El ICV del reproceso de la fracción inerte incluye los consumos y emisiones para los ítems mencionados.

El porcentaje de sustitución en este caso es de 1:1, asumiendo que puede sustituirse indefinidamente el árido reciclado en nuevas aplicaciones de reemplazo del árido natural.

*Reproceso de la fracción de plástico*

Para la adopción de los datos se ha supuesto que el plástico recuperado está mezclado. El reproceso de este material contabiliza en el inventario la energía necesaria para la trituración y fundición del plástico residual, según recomendaciones de Ecoinvent (SCLCI, 2008). La Tabla 4.24 señala los datos incluidos del reproceso del plástico residual, y del producto evitado.

La consideración de las cargas evitadas requiere calcular las cargas ambientales de la producción de plástico virgen. Esto es, contabilizar los recursos utilizados y estimar las emisiones al agua, al aire y los residuos sólidos; inclusive el impacto al suelo en su caso.

**Tabla 4.24** Productos evitados y reproceso del plástico residual

Productos evitados
Obtención de minerales, transporte y fabricación de granulado plástico [ Polietileno de alta densidad (0,4 kg), policloruro de vinilo (PVC) (0,20 kg), tereftalato de polietileno (PET) (0,4 kg)]
Consumo por reproceso de plástico residual
Energía eléctrica por 1 kg de plástico mixto reprocesado (formación granulado)

Fuente: Elaboración propia

En este caso la proporción de sustitución de material virgen versus material reciclado es de 1: 0,81. Este valor, propuesto por Rigamonti *et al.* (2009) se basa en la diferencia entre el valor de mercado del material virgen y del material reciclado. El método asume que la capacidad de sustitución se refleja en la relación entre los precios de mercado del material reprocesado y primario.

*Reproceso de la fracción de vidrio*

En el caso del reproceso del vidrio se ha supuesto que el vidrio recuperado está mezclado en distintos colores, aunque se estima que existirá una mayor cantidad de vidrio transparente, pero no se tienen datos fidedignos de composición. Los datos de entrada corresponden al consumo de combustible y energía por el reproceso del vidrio y las salidas están constituidas por las emisiones al aire, emisiones al agua, los residuos sólidos generados y el impacto sobre el suelo.

La consideración de las cargas evitadas requiere calcular las cargas ambientales de la producción de vidrio virgen. Esto es, contabilizar los recursos utilizados y estimar las emisiones al agua, al aire y los residuos sólidos y el impacto al suelo en su caso.

Dado que todos los procesos de vidrio virgen incorporan siempre algún porcentaje de vidrio recuperado, no se cuenta con datos de producción 100 % de vidrio virgen, si no que se estiman por extrapolación de datos para tasas de reciclaje del 100% 65% y 60%. (McDougall, 2004a). En este caso se obtiene entre ambos procesos (vidrio virgen y vidrio reprocesado 100%) un ahorro energético del 25%. Buwal (1998) propuso calcular el ahorro de energía de la siguiente manera:

$$\text{Ahorro de energía (\%)} = 0,25 * (\% \text{ utilizado de vidrio reprocesado})$$

La Tabla 4.25 indica, en forma genérica, las entradas y salidas del reproceso de la fracción vidrio, incluida la carga evitada.

**Tabla 4.25** Productos evitados y reproceso del vidrio residual

Productos evitados
Obtención de minerales, transporte y fabricación de 1 t de vidrio virgen.
Consumos por reproceso del vidrio recuperado
Electricidad por reprocesamiento de 1 t de vidrio recuperado

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de sustitución en este caso es de 1:1 pues el vidrio triturado puede ser repetidamente fundido sin pérdida de calidad.

*Reproceso de la fracción de madera*

En el caso de los residuos de madera, los datos de inventario para el producto evitado y de reproceso de la madera residual se indican en la Tabla 4.26 . El producto evitado comprende desde el crecimiento de la planta y su captación de CO<sub>2</sub> (lo que redonda en un crédito de CO<sub>2</sub> respecto de la madera reciclada) su obtención, transporte y trituración.

**Tabla 4.26** Productos evitados y reproceso de la madera residual

Productos evitados
Crecimiento, obtención, transporte y trituración de 1 t de madera
Consumos por reproceso de madera residual
Energía eléctrica por trituración de 1 t de madera residual

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de sustitución en este caso es de 1:1, asumiendo que puede sustituirse indefinidamente la madera procesada en nuevas aplicaciones de reemplazo de la madera natural.

*Reproceso de la fracción de cartón/papel*

En el caso de los RCD, esta fracción se compone mayormente de cartón, por lo que a los fines del cálculo se desprecia el porcentaje de papel. La Tabla 4.27 indica los productos evitados y el reproceso del cartón residual.

**Tabla 4.27** Productos evitados y reproceso del cartón residual.

Productos evitados
Obtención de minerales, transporte y fabricación de 1 t de pasta base de cartón
Consumos por reproceso de cartón residual
Energía y recursos para reprocesar 1 t de cartón corrugado

Fuente: Elaboración propia

En este caso, el porcentaje de sustitución es de 1: 0,83. Este valor, calculado a partir del número posible de ciclos de reproceso, refleja la diferencia existente en las propiedades mecánicas y de color entre la pulpa virgen y la pasta reciclada y por lo tanto permite tener en cuenta la pérdida de calidad del material. (Rigamonti *et al.*, 2009).

*Reproceso de la fracción de metales*

El detalle en la consideración de fracciones de metales ferrosos y no-ferrosos dependerá de la importancia que estos materiales representen en el subsistema. Para el caso del inventario se ha incluido sólo el metal férnico dados los muy bajos porcentajes de otros metales informados en la bibliografía (Lund, 1996; Elías, 2009d). En el caso de los metales ferrosos, los productos evitados y el reproceso del hierro residual se contabilizan según se indica en la Tabla 4.28 .

**Tabla 4.28** Producto evitado y reproceso del metal residual

Productos evitados
Obtención de minerales, transporte y fabricación de 1 t de arrabio (material fundido que se obtiene en el alto horno mediante reducción del mineral de hierro)
Consumos por reproceso de chatarra
Energía y recursos por clasificación y compactación de bloques de 1t de chatarra de hierro

Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de sustitución en este caso es de 1:1, considerando que puede sustituirse indefinidamente la chatarra en nuevas aplicaciones de reemplazo del arrabio sin modificar las propiedades mecánicas del material.

La Tabla 4.29 sintetiza para los RCD, los materiales recuperados, los productos evitados y la proporción de sustitución correspondiente a cada fracción de residuo reprocesado que no siempre alcanza a ser del 100 %.

**Tabla 4.29** Fracciones residuales, productos evitados y proporción de sustitución

Material recuperado	Producto evitado	Proporción sustitución
cartón/papel	pasta base de cartón	1: 0,83
inerte	grava en cantera	1:1
metales (férico)	arrabio	1:1
madera	madera triturada	1:1
plástico	plástico granulado	1: 0,81
vidrio	vidrio virgen	1:1

Una vez cuantificados todos los datos de inventario se obtiene un conjunto de valores organizados en la Tabla 4.30 para el inventario de ciclo de vida del reproceso con todos los procesos involucrados.

**Tabla 4.30** Modelo de planilla de datos de ICV del reproceso

Fracción residual j	Inventario de consumo de recursos y emisiones/t RCD de la etapa de reciclaje							
	Uso Contenedor		Transporte II		Reproceso del residuo		Carga evitada	
	Materia prima-energía	Emisiones e impactos	Materia prima-energía	Emisiones e impactos	Materia prima-energía	Emisiones e impactos	Materia prima-energía	Emisiones e impactos
A <sub>1</sub>								
A <sub>2</sub>								
A <sub>j</sub>								
A <sub>n</sub>								

**4.7.3. Evaluación de impacto de ciclo de vida de la etapa Tratamiento: Reciclaje**

La evaluación del impacto del ciclo de vida de la etapa de Reciclaje contempla las cargas por uso de contenedor, transporte y del reproceso del material residual. A estos impactos se suman impactos del producto evitado con signo opuesto. Por lo tanto en la ecuación de cálculo, se tendrán cuatro valores de indicadores de categoría de impacto (Ecuación 4.17):

$$IndRE_{jt} = [[Ind. C_{itj} + Ind. T_{itj}] \times Es_j + [Ind. Rep_{jt} - Ind. PE_{jt}] \times Ep_j \times Ps_j] \times \frac{\% Aj}{100}$$

Ec. (4.17)

Siendo:

*IndRE<sub>jt</sub>*: Indicador de categoría de impacto del Reciclaje por una tonelada de la fracción residual j

*Ind. C<sub>it</sub>*: Indicador de categoría de impacto del contenedor para la fracción residual *j*

*Ind. T<sub>it</sub>*: Indicador de categoría de impacto del transporte de la fracción residual *j*

*Ind. Rep<sub>ij</sub>*: Indicador de categoría de impacto del reproceso de la fracción residual *j*

*A<sub>j</sub>*: porcentaje de la fracción residual *A<sub>j</sub>*

*Ep<sub>j</sub>*: Eficiencia de la fracción *j*

*Ps<sub>j</sub>*: Proporción de sustitución de la fracción residual *j*

*Ind. PE<sub>ij</sub>*: Indicador de categoría de impacto del producto evitado que sustituye a la fracción residual *j*

Respecto de los indicadores por uso de contenedor y por transporte, éstos ya fueron referidos en los apartados 4.4 y 4.5 de este Capítulo, por lo que sólo se necesita seleccionar y calcular los mismos para cada fracción residual. Cabe señalar que el transporte de los RCD desde obra a planta de reproceso o desde planta de clasificación a reproceso, será un elemento importante en las cargas totales del reciclaje, dependiendo fundamentalmente de las distancias que haya que recorrer.

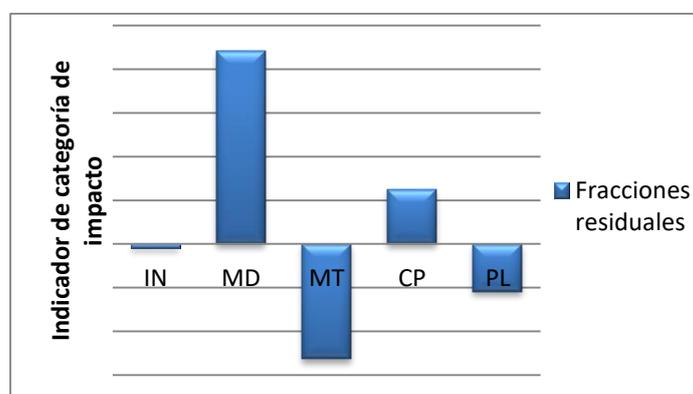
En cuanto a los indicadores por reproceso y producto evitado éstos se calcularán según los procesos unitarios que correspondan a cada fracción residual, no pudiendo expresarse en una ecuación general por la diversidad de variables involucradas. Las Tablas 4.23 a 4.30 contienen los datos genéricos que se necesitan para la obtención de los indicadores. La Tabla 4.31 agrupa los indicadores de Reciclaje que se obtendrían de cada fracción residual y total.

**Tabla 4.31** Modelo de planilla de indicadores del reciclaje de cada fracción residual y total

Fracción residual	Indicadores de categoría de impacto <i>Ind. RE<sub>j</sub></i>						
	ADP / t	EP / t	AP / t	GWP / t	ODP / t	POCP / t	LUP / t
A <sub>1</sub>							
A <sub>2</sub>				<i>IndRE<sub>jt</sub></i>			
A <sub>j</sub>							
A <sub>m</sub>							
Ind.RE total	$\Sigma ADP_i$	$\Sigma EP_i$	$\Sigma AP_i$	$\Sigma GWP_i$	$\Sigma ODP_i$	$\Sigma POCP_i$	$\Sigma LUP_i$

La evaluación de impactos de ciclo de vida del reciclaje de cada fracción residual permite graficar comparativamente los resultados para cada categoría de impacto analizada.

La Figura 4.20 por ejemplo, grafica para una categoría de impacto los distintos valores del indicador de reciclaje para las fracciones residuales.



**Figura 4.20** Ejemplo de gráfica de EICV por reciclaje

La Figura 4.21 muestra la contribución relativa del reciclaje de cada fracción residual a las categorías de impacto bajo estudio en el total de las cargas de reciclaje.

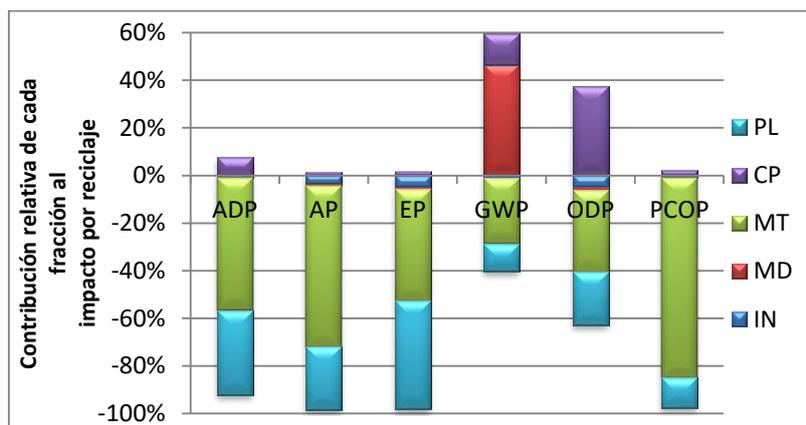


Figura 4.21 Ejemplo de gráfica de EICV cada fracción reciclada

#### 4.7.4. Interpretación de resultados de la etapa Tratamiento: Reciclaje

A partir del concepto explicado y esquematizado en la Figura 4.18 , para evaluar las cargas del reciclaje se necesita conocer las distancias de transporte a las que se encuentran las plantas donde se reprocesan los materiales y se introducen nuevamente al ciclo de producción.

Los ejemplos de las gráficas mostrados en las Figura 4.20 y Tabla 4.21 permiten realizar distintas interpretaciones. Así, en la Figura 4.20 las barras por encima del eje horizontal significan contribuciones al impacto (por ejemplo para MD y CP), en tanto las barras por debajo del eje se interpretan como ahorros. En este último caso, las cargas ambientales evitadas por la sustitución de material virgen son mayores a los impactos debido al reproceso de la fracción de que se trate (por ejemplo IN, MT y PL).

Otro análisis posible es estudiar la contribución relativa del reciclaje de cada fracción residual a las categorías de impacto bajo estudio en el total de las cargas de reciclaje. (Figura 4.21 ) En este caso por ejemplo, la MD tiene una importante contribución al GWP junto al PC. En tanto los ahorros vienen dados por el reproceso de MT y PL para todos los indicadores de categoría de impacto. De estas observaciones pueden surgir recomendaciones en apoyo o no al reciclaje de las fracciones más impactantes.

Finalmente, la EICV del reciclaje, considerada como una etapa que constituye un SGIRCD, permite evaluar su participación en el ciclo de vida completo del sistema.

#### 4.8. ACV de la etapa de Tratamiento: Recuperación de áreas

La recuperación de áreas es considerada como un tipo de tratamiento de los RCD, que consiste en la disposición en terreno de los RCD en un área que ha sido degradada por explotación de áridos, arcillas o minerales en general, obteniéndose un beneficio relacionado a su re inserción ambiental y paisajística.

La característica de los RCD a depositar en estos rellenos es la de inertes, y se trata en esta tesis como un vertedero de inertes (CE, 2003). El uso posterior que se quiera dar a la superficie recuperada, definirá el plan de explotación adecuado. Esa adecuación se traducirá en las medidas adoptadas para evitar asentamientos posteriores, tales como el grado de compactación de los residuos, el tamaño máximo de los RCD que se reciban, el tamaño de las celdas de

relleno, o para minimizar los impactos ambientales al entorno, tales como la impermeabilización del fondo, la aparición de vectores, la afectación del paisaje, entre otras.

En esta etapa cobra mayor importancia la evaluación de impactos por uso del suelo, al igual que en la etapa de vertido, ya que se ocupan y transforman grandes extensiones de terreno respecto a lo que sucede en otras etapas del SGIRCD.

#### 4.8.1. Objetivos, alcance y unidad funcional de la etapa Tratamiento: Recuperación de áreas

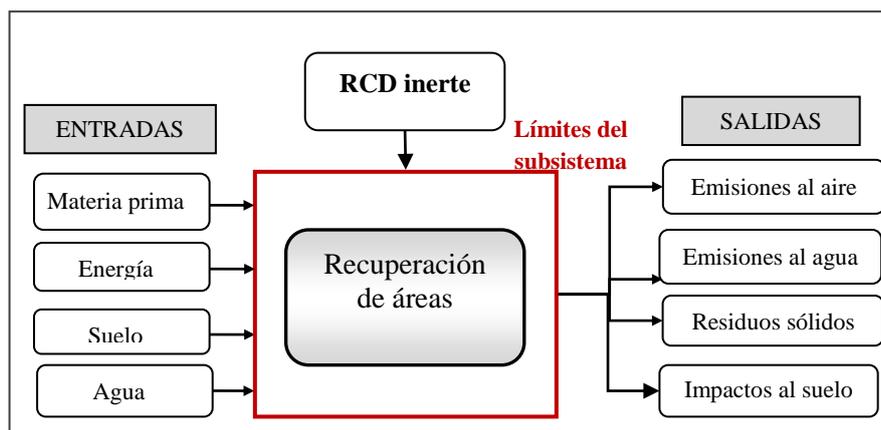
##### Objetivo

El objetivo es evaluar las cargas ambientales que se vinculan con la etapa de Recuperación de áreas (RA).

##### Alcance y límites del subsistema

La Figura 4.22 indica las entradas y salidas y los límites del subsistema Recuperación de áreas.

Las entradas están determinadas por los residuos a disponer, el consumo de energía, materiales y agua por la explotación del relleno, y el uso del suelo. Como salidas se cuantifican las emisiones al aire, emisiones al agua, los residuos sólidos y el impacto por uso del suelo que será beneficioso.



**Figura 4.22** Límites del subsistema en etapa de Tratamiento: Recuperación de áreas

*Fuente: Elaboración propia*

Como criterio sobre la admisibilidad de RCD en vertedero de inertes se toman los determinados por la Decisión CE, (2003). Esta lista se señala en la Tabla 4.32 .

Asimismo, la Decisión aclara que no se admite:

- Ningún residuo de la construcción y demolición contaminado con sustancias orgánicas o inorgánicas peligrosas a consecuencia de procesos de producción en la construcción, contaminación del suelo, almacenamiento y uso de plaguicidas u otras sustancias peligrosas, etc., salvo si se deja claro que la construcción derribada no estaba contaminada de forma significativa.
- Ningún residuo de la construcción y demolición tratado, revestido o pintado con materiales que contengan sustancias peligrosas en cantidades significativas.

**Tabla 4.32** RCD admisibles en vertederos de inertes

CER (CE, 2000)	Descripción	Restricciones
17 01 01	Hormigón	Solamente residuos seleccionados de construcción y demolición (*)
17 01 02	Ladrillos	Solamente residuos seleccionados de construcción y demolición (*)
17 01 03	Tejas y materiales cerámicos	Solamente residuos seleccionados de construcción y demolición (*)
17 01 07	Mezclas de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos	Solamente residuos seleccionados de construcción y demolición (*)
17 02 02	Vidrio de construcción	
17 05 04	Tierra y piedras	Excluidas la tierra vegetal, la turba y las piedras de terrenos contaminados
(*) Residuos seleccionados de la construcción y demolición con bajo contenido en materiales de otros tipos como metales, plástico, residuos orgánicos, madera, caucho, etc. y de origen conocido.		

Fuente: Elaboración propia

#### Unidad funcional

La unidad funcional es la recuperación de áreas mediante vertido de 1 t de RCD inerte.

#### 4.8.2. Datos de inventario de la etapa Tratamiento: Recuperación de áreas

Durante las operaciones para llevar a cabo el relleno de áreas degradadas se consume energía eléctrica y combustible. Se utiliza también agua para minimizar el particulado propio de los movimientos de RCD. Por lo cual se requieren datos de consumos y emisiones por los ítems mencionados.

La Tabla 4.33 resume, en general, los datos necesarios de entradas para cuantificar las cargas ambientales de esta etapa. Se asume que los consumos son independientes del tipo de RCD (mixto o fracción) a tratar.

**Tabla 4.33** Datos de consumo para Recuperación de áreas

Item de consumo	Unidad
Combustible diesel	(l/t)
Energía eléctrica	(kWh/t)
Agua	(l/t)

En cuanto a las salidas, en un relleno de este tipo se contabilizarán las emisiones por los consumos de energía y combustibles y las propias del proceso, los lixiviados, e impactos por uso del suelo.

En el caso de los lixiviados, tratándose de residuos clasificados como no peligrosos, y en este caso inertes, sus contaminantes no son tóxicos en sí mismos, pero como se detalló en el Capítulo 1, algunas legislaciones e investigaciones recomiendan recolección y monitoreo. La cantidad dependerá de las precipitaciones de la región.

En este sentido, cabe señalar que la base de datos Ecoinvent (SCLCI, 2008) establece lo siguiente:

- En vertedero de inertes no cuantificar impactos por emisiones de lixiviado ni de gases (las considera sin significancia) debido a la disposición final de RCD en las siguientes fracciones: hormigón, pintura al agua, vidrio, yeso, inerte en general, lana mineral, embalaje de cartón, poliuretano, acero.

En el caso de los impactos por uso del suelo los datos de inventario dependerán del indicador que se utilice, considerándose genéricamente los indicadores en la Tabla 4.34 .

**Tabla 4.34** Datos de inventario por impacto de uso del suelo

Ítem	Unidad
Datos del vertedero	
Superficie ocupada	(ha)
Volumen del vaso	(m <sup>3</sup> )
Altura del vaso	(m)
Tiempo de operación de la restauración	(año)
Datos de la región	
Precipitaciones	(mm/año)
Otras	(adimensional)

El ítem “Otras” en la Tabla 4.34 se pueden citar variables tales como usos del suelo en la región, tipos de flora y fauna autóctona y calidad del suelo.

### 4.8.3. Evaluación de impacto de ciclo de vida de la etapa Tratamiento: Recuperación de áreas

La evaluación del impacto de ciclo de vida de esta etapa se expresa a través de las seis categorías convencionales de impacto y la categoría de uso del suelo.

Para las categorías convencionales, el cálculo de los indicadores se realiza tal como se expresa en la Ecuación 4.18.

$$Ind. RA_t = Ind. diesel \times f \times C_{dt} + Ind. EE \times p \times E_{et}$$

Ec. (4.18)

Siendo:

*Ind. RA<sub>t</sub>*: Indicador de categoría de impacto de la Recuperación de áreas por una tonelada de la fracción residual *j*

*Ind. diesel*: valor del indicador de cada categoría de impacto por consumo de diesel, Tabla 4.12

*C<sub>dt</sub>*: consumo de combustible diesel por tonelada de RCD tratada (l/t)

*f*: factor de equivalencia del diesel en kg/l

*Ind. EE*: valor del indicador de cada categoría de impacto por consumo de EE, Tabla 4.20

*E<sub>et</sub>*: consumo de energía por tonelada de RCD tratada (kWh/t)

*p*: factor de pérdida de las líneas de distribución de la EE

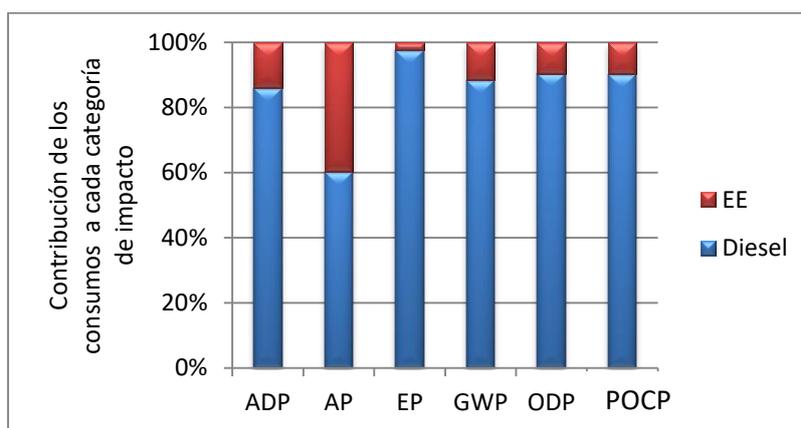
En cuanto al indicador de uso de del suelo, como ya se ha expresado, su cálculo dependerá del tipo de variables involucradas, y se considerará de signo negativo, es decir, se considera un ahorro por la recuperación de áreas.

Los impactos ambientales por categoría de impacto se agruparán en los indicadores tal como se muestra en la Tabla 4.35 .

**Tabla 4.35** Modelo de planilla de indicadores de impacto para la etapa RA

	Indicadores de categoría de impacto						
	ADP / t	EP/ t	AP/ t	GWP/ t	ODP/ t	POCP/ t	LUP/ t
Consumo diesel							-----
Consumo EE							-----
Uso del suelo	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
$Ind. RA_t$	$\sum ADP_i$	$\sum EP_i$	$\sum AP_i$	$\sum GWP_i$	$\sum ODP_i$	$\sum POCP_i$	- LUP

Los valores de indicadores obtenidos pueden representarse gráficamente tal como en la Figura 4.23 .



**Figura 4.23** Ejemplo de gráfica del EICV en etapa RA

#### 4.8.4. Interpretación de resultados de la etapa Tratamiento: Recuperación de áreas

Los resultados obtenidos en la Tabla 4.35 permiten conocer la contribución de los procesos involucrados en la construcción y funcionamiento de los rellenos de RCD con destino a la recuperación de áreas.

La Figura 4.23 indica la contribución a cada categoría de impacto del uso de energía eléctrica y diesel, por ejemplo. En este caso el análisis permite considerar la utilización de uno u otro recurso, no obstante según su disponibilidad y adaptación a los equipos de consumo.

Los impactos por uso del suelo en este caso se contabilizarán como ahorros por la reinserción ambiental y paisajística de un área degradada, es decir con signo negativo. En este sentido, se puede comparar a una situación de reciclaje o vertido (VT).

#### 4.9. ACV de la etapa Disposición Final: Vertido

La fase de eliminación de los RCD incluye el vertido de materiales en terreno, ya sea de RCD mixtos, materiales de rechazo de planta de tratamiento o de otros materiales reciclables que por razones ambientales, económicas o técnicas no puedan ser valorizados. Se diferencia de la recuperación de áreas porque el sitio elegido para el relleno se diseña y elige sólo para el fin del vertido de residuos. Por otra parte, la RA se limita a la recepción de RCD inertes, en tanto en la etapa de vertido se consideran todas las fracciones de RCD, a excepción de los peligrosos que se gestionan por otro sistema.

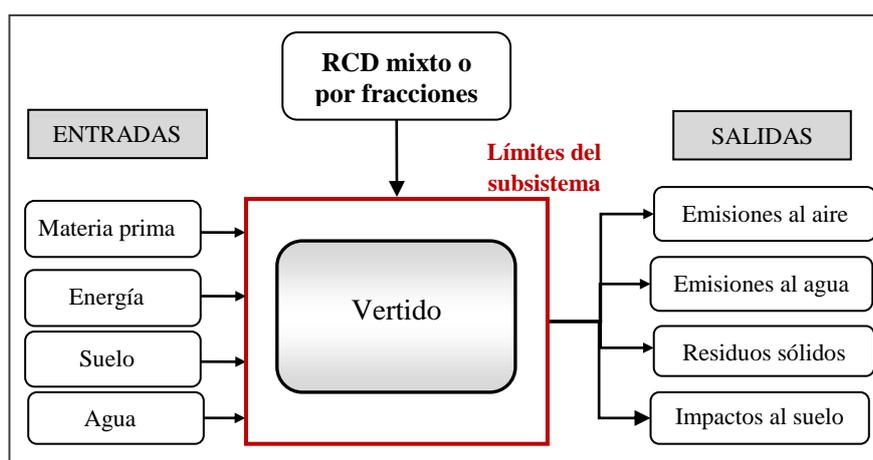
### 4.9.1. Objetivos, alcance y unidad funcional de la etapa Disposición Final: Vertido

#### Objetivo

El objetivo es evaluar las cargas ambientales que se vinculan con la etapa de vertido en terreno.

#### Alcance y límites del subsistema

La Figura 4.24 ilustra los límites y alcance del subsistema correspondiente a la etapa de vertido. En este modelo las entradas y salidas son las mismas que para la RA como se observa en la misma figura.



**Figura 4.24** Límites del subsistema en la etapa de disposición final: vertido  
Fuente: Elaboración propia

#### Unidad funcional

La unidad funcional es el vertido de 1 t de RCD. En este caso podría ir a vertido el total de los RCD o por fracciones desechadas.

### 4.9.2. Datos de inventario de la Disposición final: Vertido

Durante la explotación de un vertedero controlado se requieren los mismos datos de inventario que para un proyecto de Recuperación de áreas, por lo que se remite a las Tabla 4.33 y Tabla 4.34 de este Capítulo.

La Tabla 4.36 indica la lista de RCD y su requerimiento de vertedero e incluye aquéllos ya mencionados para RA y otros que son de características no peligrosas (CE, 2003).

**Tabla 4.36** Indica una lista de RCD y su requerimiento de vertedero

CER (CE, 2000)	Descripción	Vertido
Inertes (según Tabla 4.32)	Categorías mencionadas en Tabla 4.32	Vertedero de inertes
17 08	Materiales de construcción a base de yeso	Vertedero de no peligrosos
17 06	Materiales de aislamiento y materiales de construcción que contienen amianto	Vertedero de no peligrosos
17 02	Madera y plástico	Vertedero de no peligrosos
17 04	Metales (incluidas sus aleaciones)	Vertedero de no peligrosos

Fuente: Elaboración propia

Como se observa a la lista de la Tabla 4.36, se han agregado otros materiales residuales que deben ser trasladados a vertederos de no peligrosos (por ejemplo, vertederos de residuos domiciliarios) según la norma citada.

Otra problemática ya detectada y que ha de ser incluida en próximos ACV, es la emisión de compuestos de azufre provenientes de residuos de yeso (Doka, 2007). Pero aún no se cuenta con datos de inventario que puedan modelar el ciclo de vida del residuo de yeso para incorporarlo al estudio de ACV, por lo que es una consideración para futuras investigaciones.

En los vertederos de no-peligrosos las emisiones de lixiviados y gases de proceso, en general, son de mayor impacto ambiental que en un vertedero de inertes. Por ejemplo, una reseña para los componentes de lixiviados de residuos no biodegradables se presenta en la Tabla 4.37 .

**Tabla 4.37** Lixiviado generado por residuos no biodegradables

Emisiones al agua (g/m <sup>3</sup> de lixiviado generado)	
DBO <sub>5</sub>	0
DQO	0
Sólidos en suspensión	100
Sustancias orgánicas	2
AOX	2
Hidrocarburos clorados	1.03
Dioxinas	3.2e-7
Fenoles	0.38
Amonio (ión)	210
Metales	96.1
As (ión)	0.014
Cd (ión)	0.014
Cr	0.06
Cu (ión)	0.054
Fe	95
Pb	0.063
Hg	0.0006
Ni (ión)	0.17
Zn	0.68
Cloruros	590
Fluoruros	0.39

*Fuente: McDougall et al., (2001)*

A pesar de estos datos, hay pocas emisiones estandarizadas incluidas en bases de datos comerciales para los vertidos de RCD. Por lo tanto, su consideración debe ser muy cuidadosa, y habría que generar el ICV, clasificar y caracterizar por categoría de impacto.

En este sentido, cabe señalar que la base de datos Ecoinvent (SCLCI, 2008) establece lo siguiente:

- En vertedero de RCD no peligrosos se deben cuantificar impactos por emisiones debidas a la incineración del gas del vertedero y a la producción de lixiviado para RCD de aluminio, pinturas, yeso, madera, plásticos, papel y cartón, para las condiciones suizas.

Por lo detallado en estas consideraciones, puede verse que las mismas fracciones de residuo generan emisiones o no, según el medio en que han sido dispuestas y el contacto con otros residuos más reactivos o biodegradables. En consecuencia, esta consideración debe tenerse en cuenta al elaborar el ICV del vertido, según los datos disponibles.

#### **4.9.3. Evaluación de impacto de ciclo de vida de la etapa Disposición final: Vertido**

La fase de EICV se realiza del mismo modo que para la RA. La diferencia estará en los impactos por uso del suelo, que serán de signo positivo o bien de carácter perjudicial al adjudicarse un terreno especialmente para ser usado como vertedero.

Asimismo, si investigaciones futuras permiten cuantificar los impactos del proceso, estos serán incluidos en el ICV. La Tabla 4.38 agrupa los indicadores que se obtendrían de la etapa de vertido.

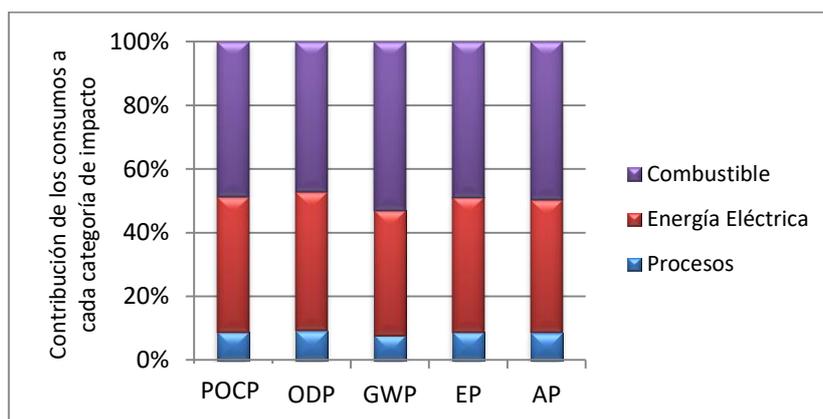
**Tabla 4.38** Modelo de planilla de indicadores de impacto para la etapa VT

	Indicadores de categoría de impacto						
	ADP / t	EP/ t	AP/ t	GWP/ t	ODP/ t	POCP/ t	LUP/ t
Consumo diesel							-----
Consumo EE							-----
Proceso del relleno*							-----
Uso del suelo	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
<i>Ind. RA<sub>i</sub></i>	$\Sigma ADP_i$	$\Sigma EP_i$	$\Sigma AP_i$	$\Sigma GWP_i$	$\Sigma ODP_i$	$\Sigma POCP_i$	<i>LUP</i>

\*En el caso de que se cuente con datos de lixiviados y emisión de gases

Fuente: Elaboración propia

La Figura 4.25 ilustra la representación de los resultados de la EICV. En la misma se puede ver la contribución de los consumos y procesos del vertido a cada categoría de impacto analizada.



**Figura 4.25** Ejemplo de gráfica de EICV en etapa VT

#### 4.9.4. Interpretación de resultados de la etapa Disposición final: Vertido

Finalmente, para la última fase del ACV de esta etapa se siguen los mismos lineamientos que para la RA, pudiendo compararse del mismo modo con la alternativa del Reciclaje o con la de RA. Cabe señalar que en los estudios comparativos hay que incluir el transporte del RCD hacia los sitios de RA o VT para que los resultados sean equitativos.

#### 4.10. Combinación de etapas del SGIRCD: generación de escenarios

El estudio y análisis completo de un SGIRCD se realiza con una combinación de las etapas estudiadas. Como se ha visto en cada etapa pueden surgir distintas alternativas, por lo cual pueden generarse diversas combinaciones para una misma etapa, y entre etapas consecutivas. Cada combinación entre etapas consecutivas se define como un escenario.

La generación de dos o más escenarios posibilita a su vez análisis comparativos de los indicadores ambientales de cada uno. El analista podrá decidir en base a estos resultados el escenario óptimo desde una perspectiva ambiental.

A los fines de ilustrar lo dicho en los párrafos precedentes se plantean distintos escenarios posibles, indicados en las Tabla 4.26 y Figura 4.27, pudiendo generarse otros, según el caso a analizar.

- Escenario S1: corresponde a la disposición sin control y el escenario S2 corresponde a un vertido controlado. En este segundo caso las rutas de transporte y los sitios de disposición final son múltiples en la mayoría de los casos. (Figura 4.26)

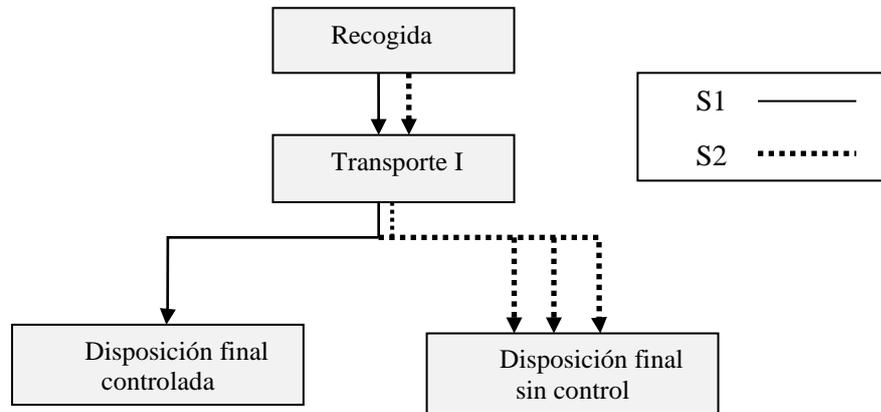


Figura 4.26 Escenarios S1 y S2 de SGIRCD

- Escenario S3: considera la instalación de una PCRI y el reciclaje de algunas fracciones residuales, tales como metales e inertes (Figura 4.27).

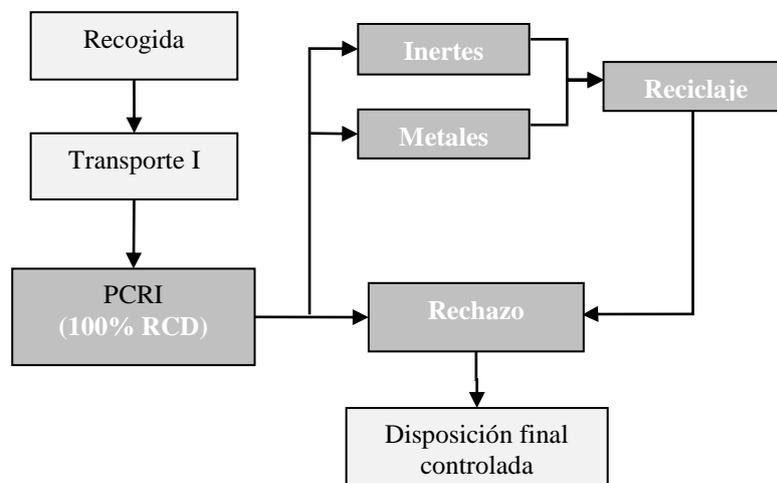


Figura 4.27 Escenario S3 de SGIRCD

#### 4.11. Conclusiones del Capítulo

El análisis de ciclo de vida de cada etapa del sistema de gestión integral de los RCD ha requerido vincular distintas variables involucradas en los procesos que corresponden a cada una con distintos niveles de complejidad en el planteo de las ecuaciones a emplear. Su aplicación en la práctica va a depender de los datos disponibles, pudiendo realizarse simplificaciones a costa de tener menor precisión en los resultados.

Puede verse que hay variables comunes a varias etapas, tales como el consumo de combustibles y de energía eléctrica, por lo que los cálculos de indicadores de categoría de

impacto son comunes en estos casos, tales como en el transporte, PCRI, recuperación de áreas y vertido.

La metodología propuesta ha permitido visualizar la relación y dependencia entre cada una de las etapas, las consideraciones a tener en cuenta en cada alternativa planteada dentro de cada una y una visión integral de todo el sistema de gestión.

# CAPÍTULO 5. CATEGORÍAS DE IMPACTO DE CICLO DE VIDA APLICADAS A LA GESTIÓN DE RCD

---

## Resumen

En este capítulo se seleccionan las categorías de impacto más adecuadas para la evaluación ambiental del ciclo de vida de un sistema de gestión de RCD y sus indicadores. Además de aplicar categorías de impacto que tradicionalmente se utilizan en los estudios de ACV, se ha definido un nuevo indicador específico para la categoría de impacto de uso del suelo en tierras secas.

### 5.1. Aspectos generales sobre la de evaluación de impactos ambientales en el ACV

La evaluación de los impactos y la selección de indicadores de desempeño ambiental de un sistema producto o servicio incluye muchos elementos. Se requiere del conocimiento sobre las emisiones y los flujos de recursos del sistema estudiado, así como de mecanismos ambientales y la posición en las cadenas de causa-efecto (Steen, 2001).

Para los objetivos de esta tesis se utilizarán métodos de evaluación de impactos ambientales que pueden clasificarse como clásicos (Jolliet *et al.*, 2004) siendo aquéllos que evalúan el impacto ambiental en un punto intermedio (*midpoint*) de la cadena causa-efecto, sin llegar a identificar el daño causado al hombre y a los sistemas naturales, como sí lo hacen las metodologías de punto final (*endpoint*).

La Figura 5.1 indica la estructura general del marco de la evaluación de impacto ambiental del ciclo de vida. Como se muestra en la misma, los resultados del ICV con vías de impacto similares (por ejemplo, todos los flujos elementales que influyen en las concentraciones de ozono estratosférico) se agrupan en categorías de impacto a nivel de *midpoint*. Un indicador de *midpoint* caracteriza los flujos elementales y otras intervenciones ambientales que contribuyen al mismo impacto. El término *midpoint* expresa el hecho de que este punto se encuentra en algún lugar en una posición intermedia entre los resultados del ICV y el daño (*endpoint*) en la cadena de impacto. En consecuencia, un paso adicional puede asignar estas categorías de punto

medio a una o más categorías de daño, en representación de los cambios de calidad del medio ambiente. Un indicador de daño es la representación cuantificada de este cambio de calidad. En la práctica, un indicador de daño es siempre un modelo simplificado de una realidad muy compleja, dando sólo una aproximación.

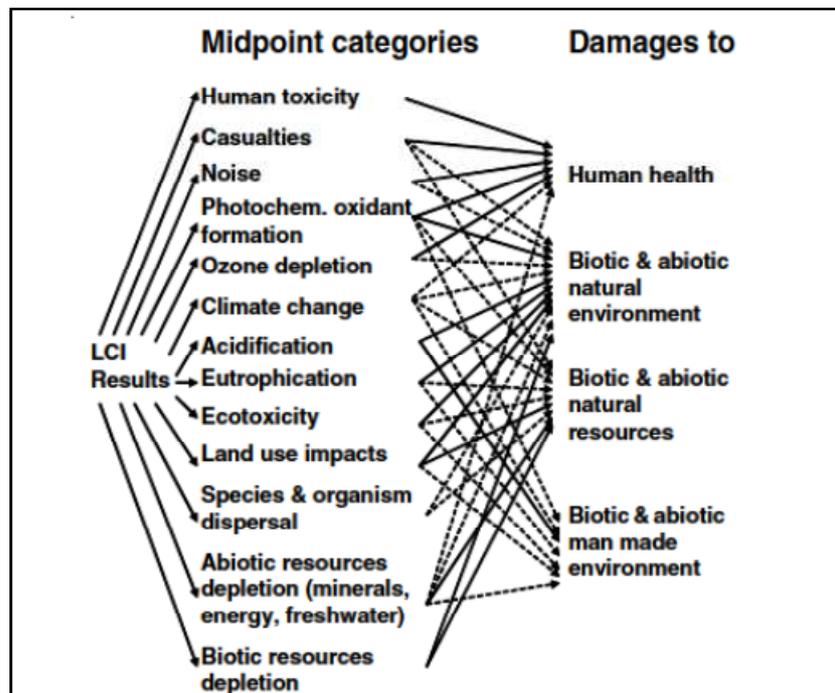


Figura 5.1. Marco general de la EICV  
(Jolliet *et al.*, 2003)

Uno de los métodos que utiliza un enfoque intermedio (*midpoint*) para realizar el análisis del impacto del ciclo de vida es el CML 2001 (Guinée *et al.*, 2001), el cual se ha elegido en esta tesis como método principal de evaluación de impactos debido a que cuenta con aceptación internacional y considera una amplia gama de categorías de impacto. Bajo el mismo, se evalúan, por ejemplo, los impactos debidos a la acidificación, disminución de ozono estratosférico, eutrofización acuática y terrestre, calentamiento global, formación de foto-oxidantes, toxicidad humana, agotamiento del recurso abiótico y ecotoxicidad.

## 5.2. Categorías de impacto frecuentemente utilizadas en la aplicación del ACV

En lo que sigue se realiza una breve referencia y descripción de las categorías de evaluación de impacto frecuentemente empleadas y sus indicadores, en los estudios de ACV. Con relación a estos últimos, los factores de caracterización correspondientes a las categorías de impacto calentamiento global, disminución de ozono estratosférico, formación de foto-oxidantes, agotamiento del recurso abiótico, eutrofización, acidificación, toxicidad humana y ecotoxicidad, se basan en Guinée *et al.* (2001). Respecto a los impactos por uso del suelo y del agua los métodos de evaluación e indicadores son diversos y se referirán cada uno en particular.

### 5.2.1. Calentamiento global

El calentamiento global, también conocido como “efecto invernadero”, se define como el impacto de las emisiones antropogénicas sobre la fuerza de la radiación, causando que aumente la temperatura superficial de la Tierra. El indicador que cuantifica esta categoría se calcula teniendo en cuenta el potencial de calentamiento global de la sustancia en cuestión y su

expresión se indica en la según la Ecuación 5.1. El indicador utilizado es el potencial de calentamiento global (*GWP*, por sus siglas en inglés, *Global Warming Potential*), que se mide en unidades de kg CO<sub>2</sub> eq.

$$GWP = \sum GWP_i * m_i$$

Ec. (5.1)

*Siendo:*

*GWP*: Indicador de la categoría Calentamiento global

*GWP<sub>i</sub>*: Factor de caracterización por calentamiento global potencial del compuesto *i* (kg de CO<sub>2</sub> equivalente/kg<sub>mi</sub>)

*m<sub>i</sub>* : cantidad del compuesto *i* (kg)

El *GWP* dependerá del tiempo de integración. Generalmente, se adopta en los estudios de ACV un periodo de tiempo de 100 años, existiendo valores de *GWP* diferentes para 20 y 500 años.

### 5.2.2. Acidificación

El efecto de acidificación se genera por la existencia de distintos contaminantes primarios gaseosos, como por ejemplo, el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) o el óxido de nitrógeno (NO), que combinados con el agua existente en la atmósfera dan lugar a compuestos ácidos que provocan una disminución del pH al entrar en contacto con el ecosistema existente (suelo, agua subterránea, agua superficial, los organismos vivos y el entorno construido).

El indicador que mide esta categoría de impacto es el potencial de acidificación (*AP*, por sus siglas en inglés, *Acidification Potential*), que se calcula según la Ecuación 5.2 y se mide en unidades de kg SO<sub>2</sub> eq.

$$AP = \sum AP_i * m_i$$

Ec. (5.2)

*Siendo:*

*AP*: Indicador de la categoría Acidificación

*AP<sub>i</sub>* : Factor de caracterización por acidificación potencial del compuesto *i* (kg de SO<sub>2</sub> equivalente/kg<sub>mi</sub>)

*m<sub>i</sub>* : Emisión del compuesto *i* (kg)

### 5.2.3. Eutrofización

Esta categoría se define por el aumento de niveles de nutrientes (nitrógeno y fósforo) excesivamente altos que pueden provocar un exceso de producción de biomasa en los ecosistemas acuáticos y terrestres.

El indicador que mide esta categoría de impacto es el potencial de eutrofización (*EP*, por sus siglas en inglés, *Eutrophication Potential*), que se calcula según la Ecuación 5.3 y se mide en unidades de kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq.

$$EP = \sum EP_i * m_i$$

Ec. (5.3)

Siendo:

*EP*: Indicador de la categoría Eutrofización

*EP<sub>i</sub>*: Factor de caracterización por eutrofización potencial de la sustancia *i* (kg de PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> equivalente/kg<sub>mi</sub>)

*m<sub>i</sub>*: es la masa de la sustancia *i* emitida (kg)

#### 5.2.4. Formación de foto-oxidantes

La formación de foto-oxidantes es la generación de compuestos químicamente reactivos tales como ozono, por la acción de la luz del sol sobre ciertos contaminantes primarios. Estos compuestos reactivos pueden ser dañinos a la salud humana y al ecosistema y pueden también afectar a los cultivos.

Los foto-oxidantes se pueden formar en la troposfera bajo la influencia de la luz ultravioleta, a través de reacciones de oxidación de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV<sub>s</sub>) y monóxido de carbono en la presencia de óxidos de nitrógeno. El ozono es considerado como el más importante de estos agentes, junto con el peroxi-acetil-nitrato (PAN). El indicador de formación de foto-oxidantes se obtiene al identificar los factores de conversión o reactividad para los COVs. Estos factores son usados para convertir el inventario de COVs en etileno equivalentes.

El indicador que mide esta categoría de impacto es el potencial de ozono fotoquímico (*POCP*; por sus siglas en inglés *Photochemical Ozone Creation Potential*), que se calcula según la Ecuación 5.4 y se mide en unidades de kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq.

$$POCP = \sum POCP_i * m_i$$

Ec. (5.4)

Siendo:

*POCP*: Indicador de la categoría Formación de foto-oxidantes

*POCP<sub>i</sub>*: Factor de caracterización por potencial de ozono fotoquímico de la sustancia *i* (kg de etileno equivalente/kg<sub>mi</sub>)

*m<sub>i</sub>* es la masa de la sustancia *i* emitida (kg)

#### 5.2.5. Agotamiento del recurso abiótico

Los recursos abióticos son recursos naturales (incluidos los recursos energéticos) tales como hierro, petróleo y minerales inertes. El agotamiento de los mismos depende de las reservas existentes y las tasas de extracción del recurso, que combinados, ofrecen una indicación de la gravedad de su agotamiento.

El indicador que mide esta categoría de impacto es el potencial de agotamiento del recurso abiótico (*ADP*, por sus siglas en inglés, *Abiotic Depletion Potential*), que se calcula según la Ecuación 5.5 y se mide en unidades de kg Sb eq.

$$ADP = \sum ADP_i * m_i$$

Ec. (5.5)

Siendo:

*ADP*: Indicador de la categoría Agotamiento del recurso abiótico

*ADP<sub>i</sub>*: Factor de caracterización por potencial de agotamiento del recurso abiótico *i* (kg de Sb equivalente/kg<sub>mi</sub>)\*

*m<sub>i</sub>*: cantidad de recurso *i* extraído (kg)

\*excepto para: gas natural (kg de Sb equivalente/m<sup>3</sup>); y energía (kg de Sb equivalente/MJ energía fósil)

### 5.2.6. Disminución del ozono estratosférico

El efecto de disminución del ozono estratosférico se produce por causa de los cloruros y bromuros procedentes de compuestos cloro-fluoro-carbonados (CFCs), y otras fuentes, que reaccionan en presencia de las nubes estratosféricas polares (PSCs) emitiendo cloruros y bromuros activos que bajo la acción de los rayos ultravioleta (UV) provocan la descomposición del ozono.

La disminución de la capa de ozono provoca un incremento de la cantidad de rayos UV que llegan a la superficie de la Tierra, lo cual genera algunas enfermedades como el cáncer de piel y las cataratas; la afectación de la producción agrícola y la degradación de los materiales plásticos, entre otros problemas.

El indicador que mide esta categoría de impacto es el potencial de disminución del ozono (*ODP*, por sus siglas en inglés, *Ozone Depletion Potential*), que se calcula según la Ecuación 5.6 y se mide en unidades de kg CFC-11 eq.

$$ODP = \sum ODP_i * m_i$$

Ec. (5.6)

Siendo:

*ODP*: Indicador de la categoría disminución de ozono estratosférico

*ODP<sub>i</sub>*: Factor de caracterización por potencial disminución de ozono estratosférico para la sustancia *i* (en kg CFC-11 equivalentes/kg<sub>mi</sub>)

*m<sub>i</sub>*: cantidad de la sustancia *i* en kg

### 5.2.7. Toxicidad humana

Esta categoría de impacto cuantifica los efectos negativos que tienen las sustancias tóxicas (mercurio, plomo, dioxinas) emitidas al medio ambiente sobre la salud humana. Es una categoría aún en desarrollo y presenta mucha subjetividad (den Boer *et al.*, 2005).

El indicador que mide esta categoría de impacto es el potencial de toxicidad humana (*HTP*, por sus siglas en inglés, *Human Toxicity Potential*), que se calcula según la Ecuación 5.7 y se mide en unidades de kg 1,4 DB eq.

El indicador se calcula según la Ecuación 5.7. y el factor de caracterización es el potencial

$$HTP = \sum_{i=1}^n \sum_{ecomp=1}^k m_{i,ecomp} * HTP_{i,ecomp,t}$$

Ec. (5.7)

Siendo:

*HTP*: Indicador de la categoría toxicidad humana

$HTP_{i,ecomp,t}$ : Factor de caracterización del potencial de toxicidad humana de la sustancia *i* emitida al compartimiento ambiental *ecomp*, durante el horizonte de tiempo *t* (kg de 1,4-diclorobenceno equivalentes /kg<sub>mi,ecomp</sub>)

$m_{i,ecomp}$ : cantidad de la sustancia *i* emitida para el compartimiento *ecomp* (kg)

### 5.2.8. Ecotoxicidad

En esta categoría se contemplan los efectos de los compuestos tóxicos sobre los ecosistemas terrestres o acuáticos. El conocimiento de tales efectos es mucho más fragmentado que en el caso de toxicidad humana, debido a la enorme diversidad de animales y plantas a considerar (Jolliet *et al.*, 2004). Otro reto es llegar a un acuerdo sobre un indicador de daños adecuado a nivel de "medio natural biótico" en la que termina la vía de impacto. Puede ser necesario para su estimación dividir la categoría de impacto en un número de subcategorías, como ecotoxicidad acuática, terrestre o marina.

En las categorías de toxicidad el factor transporte tiene especial relevancia ya que los contaminantes tóxicos no permanecen en el medio (aire, suelo, agua superficial, etc.) donde fueron emitidos sino que pueden desplazarse afectar otros ambientes. Un compuesto puede llegar a ser más dañino en un medio diferente al de su emisión, y esta es otra cuestión que influye en el cálculo.

El cálculo del indicador de ecotoxicidad terrestre, por ejemplo, se obtiene a partir de la Ecuación 5.8. El factor de caracterización es el *TTP* por sus siglas en inglés *Terrestrial Toxicity Potential*. Las unidades dependen del método de caracterización.

$$TTP = \sum_{i=1}^n TTP_i \times f_{i,n} \times m_i$$

Ec. (5.8)

Siendo:

*TTP*: Indicador de la categoría ecotoxicidad terrestre

$TTP_i$ : Factor de caracterización del potencial por ecotoxicidad terrestre de la sustancia *i* (la unidad depende del método de cálculo)

$f_{in}$ : fracción del compuesto *i* que se transporta hasta el medio *n* (adimensional)

$m_i$ : cantidad de la sustancia *i* emitida (kg)

### 5.2.9. Impacto por uso del suelo

Las actividades humanas generan impactos por uso del suelo, sin embargo, no existe aún consenso científico acerca de la definición de indicadores de categoría adecuados (WIA-2, 1999). Se acepta internacionalmente que en la fase de inventario del ciclo de vida hay que

centrarse en dos aspectos del uso de la tierra: el área ocupada y los cambios en la calidad del suelo. Mila i Canals *et al.* (2007) distinguen entre impactos por uso del suelo por ocupación y transformación.

Con el fin de evaluar el impacto de uso del suelo, es necesario al menos registrar en el inventario de ciclo de vida el tipo de uso de la tierra, la extensión espacial, la extensión temporal, y la ubicación geográfica. En el ICV, los flujos elementales de uso del suelo, se especifican como sigue (Koellner *et al.*, 2012):

- Para ocupación de suelo: metros cuadrados x años, el tipo de uso del suelo *i*, y la región *k*.
- Para la transformación del suelo: metros cuadrados, el tipo inicial de uso del suelo *i*, tipo final de uso del suelo *j*, y la región *k*.

Los modelos de uso del suelo desarrollados difieren en el indicador a considerar para evaluar los impactos producidos sobre la calidad de los ecosistemas, y muchos de ellos se han considerado para aplicar a la actividad agrícola, siendo difícil su aplicación para otras actividades. En este sentido, cabe citar a Civit (2009) quien aplicó un indicador de uso del suelo en tierras secas para la actividad de fabricación de ladrillos y urbanización diseñada con pautas bioclimáticas en área rural. Según Blengini *et al.*, (2010) los impactos del uso del suelo son a menudo excluidos de los estudios de ACV de la minería porque aún no se consigue un consenso internacional y metodologías bien establecidas. Siguiendo la nomenclatura adoptada para las categorías anteriores, podría denominarse su indicador *LUP*, por sus siglas en inglés *Land Use Potential*.

#### **5.2.10. Impacto por uso del agua**

El agua dulce es un recurso vital pero a menudo escaso, motivo por el cual la comunidad de evaluación del ciclo de vida ha realizado grandes esfuerzos en el desarrollo de métodos para abordar adecuadamente el uso del agua. Berger *et al.* (2010) realizó un examen crítico de una amplia gama de métodos desarrollados para permitir la evaluación del impacto del uso del agua con enfoque de ciclo de vida. Su estudio revela que los alcances metodológicos difieren con respecto a los tipos de uso del agua, la inclusión de la escasez de agua local, así como la diferenciación entre los cursos de agua y los aspectos de calidad.

Actualmente hay un enfoque respecto al impacto del uso del agua, la huella hídrica. En opinión de Jefferies *et al.* (2012) existen sinergias potenciales entre los dos enfoques, ya que se basan en los mismos datos de la contabilidad del agua y la evaluación del impacto, por lo cual sería beneficioso una mayor colaboración y el desarrollo conjunto de ambos métodos.

En esta tesis se menciona esta categoría de impacto, pero no se realizará su evaluación dadas las discrepancias que aún existen respecto a su indicador. Al igual que en el uso del suelo, se adopta la sigla para su indicador como *WUP*, por sus siglas en inglés *Water Use Potential*.

### **5.3. Selección de categorías de impacto en el ACV de la gestión de RCD**

A los fines de seleccionar las categorías de impacto ambiental a incluir en el ACV de la gestión de los RCD se han aplicado dos criterios. El primero de ellos tiene en cuenta antecedentes de categorías de impacto incluidas en ACV de gestión de residuos. Se revisaron las categorías de impacto incluidas en programas informáticos de cálculo de ACV aplicados a gestión de residuos sólidos domiciliarios (no se han desarrollado programas informáticos de

ACV de RCD) y aquellas incorporadas en publicaciones sobre evaluaciones ambientales de gestión de RCD con metodologías de ACV.

El segundo criterio toma en cuenta el análisis del ICV detallado en el Capítulo 4 para cada etapa, por tanto los flujos entrantes de materia prima y energía y las posibles emisiones en las etapas de gestión de los RCD, que justifique la inclusión o no de cada categoría.

### 5.3.1. Categorías de impacto incluidas en ACV de gestión de residuos

A los fines de la aplicación del primer criterio se revisaron las categorías de impacto y los indicadores incluidos en programas informáticos de ACV existentes, referidos a gestión de residuos sólidos domiciliarios, tal como se han citado en la Tabla 1.19 del Capítulo 1 de esta tesis.

Se puede observar en dicha tabla, que de los siete programas informáticos analizados, siete incluyen la categoría calentamiento global, cinco la acidificación, cuatro la eutrofización, tres el agotamiento del recurso abiótico y la toxicidad humana, dos la formación de foto-oxidantes y sólo uno la disminución de la capa de ozono. Se seleccionan, según este antecedente, aquellas categorías que fueron consideradas en al menos el 30 % de los casos estudiados, resultando solo cinco categorías: calentamiento global, acidificación, eutrofización, agotamiento del recurso abiótico y la toxicidad humana.

Con relación a la revisión de las publicaciones referidas a evaluación ambiental de gestión de RCD con técnicas de ciclo de vida, se obtuvo la síntesis mostrada en la Tabla 5.1. Los estudios y publicaciones que se registran sobre el tema, permiten ver que la categoría calentamiento global ha sido utilizada en todas las publicaciones mencionadas; acidificación y eutrofización en tres de las investigaciones; formación de foto-oxidantes, disminución de la capa de ozono, ecotoxicidad y toxicidad humana en dos de los estudios; el uso del suelo sólo en uno de ellos y recomendado para estudios futuros en otro.

**Tabla 5.1** Categorías y métodos utilizados en EICV de gestión de RCD

Referencia	Calentamiento global	Acidificación	Eutrofización	Formación de foto-oxidantes	Agotamiento del recurso abiótico	Disminución de ozono	Toxicidad humana	Ecotoxicidad	Impacto por uso del suelo	Impacto por uso del agua
Blengini, (2009)	*	*	*	*		*			*	
Blengini <i>et al.</i> , (2010)	*	*	*	*	* <sup>2</sup>	*	*	*	*	
Ortiz <i>et al.</i> , (2010)	*	*	*		* <sup>3</sup>		*	*		
Carpenter <i>et al.</i> , (2012)	*	Utiliza emisiones individuales de impacto <sup>4</sup>								
Coelho <i>et al.</i> , (2013a,b)	*									
<sup>1</sup> Recomienda utilizar impactos por uso del suelo en estudios futuros <sup>2</sup> Utiliza extracción mineral (ME) en kg <sup>3</sup> Utiliza el uso de recursos (RU) en kg <sup>4</sup> Realiza consideraciones parciales sobre uso del suelo										

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, como indicador ambiental cuatro de los trabajos presentan la cuantificación del consumo energético. Respecto al agotamiento del recurso abiótico, cabe señalar que se ha incluido como indicador ambiental de distintos modos (Uso de recursos, RU y Extracción mineral, ME) en dos de los artículos referidos, aunque no sean estas categorías de impacto.

En este caso, por ser estudios referidos a RCD se han considerado todas las categorías incluidas en los mismos. Por otra parte, todas ellas están presentes en al menos dos de las cinco publicaciones (una cantidad mayor al 30% si se adopta el mismo criterio que en el caso de los programas informáticos). Los resultados de las revisiones realizadas resultan en las categorías señaladas en la Tabla 5.2. A continuación se discute cada una:

- Calentamiento global: su selección se justifica porque está incluida en los dos antecedentes mencionados, y en el 100% de los casos. Además cabe señalar que es una categoría de relevancia internacional.
- Acidificación: su selección se justifica porque está incluida en los dos antecedentes mencionados.
- Eutrofización: su selección se justifica porque está incluida en los dos antecedentes mencionados.
- Formación de foto-oxidantes: no está incluida en la mayoría de los programas informáticos de ACV de residuos sólidos domiciliarios, pero ha sido evaluada en los estudios de ACV de RCD. Se decide incluirla, a condición del resultado del segundo criterio.
- Agotamiento abiótico: se incluye en la mayoría de los programas informáticos analizados. Con relación a los estudios de ACV de RCD no ha sido utilizada como indicador, pero si se han evaluado indicadores individuales de impacto por consumo de recursos, por lo que se decidió incluirla como categoría de impacto.
- Disminución de ozono estratosférico: esta categoría no ha sido incluida en la mayoría de los programas informáticos citados. Sin embargo, sí aparece en dos de las cinco publicaciones de ACV de RCD. Se decide incluirlo, a condición del resultado del segundo criterio.
- Toxicidad humana: Ha sido incluida en los programas informáticos analizados. En cuanto a estudios de ACV de RCD se la ha incorporado en dos de los cinco revisados. Se decide incluirla.
- Ecotoxicidad: no ha sido incluida como categoría de impacto en los programas informáticos revisados y sí ha sido evaluada en dos de las publicaciones referidas a RCD. Se decide incluirla, a condición del resultado del segundo criterio.
- Uso del suelo: Esta categoría no ha sido abordada en los programas informáticos examinados. Sin embargo, dado que sí ha sido considerada en algunos estudios de ACV de RCD, y a veces no implicada en los programas informáticos por falta de consenso en el indicador adoptado o la metodología de cálculo del mismo, se decide incluirla según los antecedentes. Su inclusión definitiva queda supeditada a la aplicación del segundo criterio de selección mencionado.
- Uso del agua: no ha sido incluida en ninguno de los antecedentes considerados. Por lo tanto, esta categoría queda excluida según el primer criterio.

**Tabla 5.2** Categorías de impacto incluidas en ACV según antecedentes

Antecedente	Calentamiento global	Acidificación	Eutrofización	Formación de foto-oxidantes	Agotamiento del recurso abiótico	Disminución de ozono	Toxicidad humana	Ecotoxicidad	Impacto por uso del suelo	Impacto por uso del agua
Software	✓	✓	✓	----	✓	----	✓	----	----	-----
ACV de RCD	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-----
Selección	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-----

Fuente: Elaboración propia

### 5.3.2. Análisis de categorías de impacto según el ICV de la gestión de los RCD

Se analizan en los párrafos siguientes las categorías de impacto y su relación con el inventario de ciclo de vida de la gestión de los RCD concluyendo en la inclusión o exclusión de cada categoría según este segundo criterio.

- **Calentamiento global:** Las emisiones procedentes de los procesos de gestión de residuos, en general, que suelen contribuir al potencial de calentamiento global incluyen CO<sub>2</sub>, óxido de nitrógeno y metano (den Boer *et al.*, 2005). En el caso de la gestión de los RCD, en particular, son pocas las fracciones que pueden someterse a tratamientos biológicos y térmicos (por ejemplo, madera) que puedan emitir tales sustancias, y muchas veces se encuentran en bajas proporciones. Por este motivo, las emisiones que contribuyen al calentamiento global serán las derivadas de los consumos de combustibles (transporte fundamentalmente), consumos de energía, y las relativas a las cargas evitadas. Se incluye la presente categoría.
- **Acidificación:** En la gestión de residuos en general, los principales impactos de esta categoría se derivan de las emisiones de óxidos de nitrógeno procedentes de los procesos biológicos y la emisión de óxido de azufre procedente de la producción de electricidad (den Boer *et al.*, 2005). En la gestión de RCD estos compuestos derivarán de los consumos de combustibles y energéticos, y su importancia puede ser relevante además en la consideración de las cargas evitadas por sustitución de material virgen. Se incluye la presente categoría.
- Por otra parte, tal como se referenció en el Capítulo 1, existen procesos de generación de ácido sulfhídrico por la presencia de yeso en los vertederos, cuya modelación está en investigación (Doka, 2007). En este caso la contribución correspondería a un proceso involucrado en la disposición final de los RCD (vertido) cuyo método de cálculo aún no ha sido determinado. Se incluye la presente categoría.
- **Eutrofización:** La eutrofización en la gestión de residuos en general, se atribuye a las emisiones atmosféricas de NO<sub>x</sub> y amoníaco, y a las emisiones al agua de fósforo y nitrógeno procedentes de procesos biológicos de tratamiento (den Boer *et al.*, 2005). En la gestión de RCD no se esperan emisiones de este tipo por tratamientos biológicos, sin embargo hay emisiones que provienen de la consideración de cargas evitadas por sustitución de material virgen y las que corresponden a los consumos energéticos y de combustibles. Se incluye la presente categoría.
- **Formación de foto-oxidantes:** Del mismo modo que el calentamiento global, las emisiones que contribuyen a esta categoría de los RCD son las derivadas de los

consumos de combustibles (transporte fundamentalmente), consumos de energía, y las relativas a las cargas evitadas. Se incluye la presente categoría.

- Agotamiento del recurso abiótico: En el caso de la evaluación de la gestión de RCD, la consideración de esta categoría se justifica por la importancia de contabilizar los aspectos positivos de la recuperación de residuos, y por tanto de la carga evitada por los ahorros en materia prima sustituida. Se incluye la presente categoría.
- Disminución de la capa de ozono: En la gestión de los RCD no es esperable emisiones que contribuyan a los CFCs de los propios procesos. Se excluye la presente categoría.
- Toxicidad humana: Las prácticas de gestión de residuos pueden suponer una considerable amenaza para la salud humana. Sin embargo, en el caso de los RCD, estos residuos contienen pocas sustancias tóxicas en su composición. Se excluye la presente categoría.
- Ecotoxicidad: por las mismas razones que en el caso de la toxicidad humana se excluye la presente categoría.
- Impactos por uso del suelo: En la evaluación de la gestión de los RCD es importante considerar la categoría de impactos por uso del suelo, teniendo en cuenta por un lado el uso del mismo por las instalaciones de tratamiento (plantas de reciclaje y disposición final en terreno, por ejemplo); y por otro en la consideración de cargas evitadas por sustitución de agregados naturales con agregados reciclados, y más aún en regiones donde el mayor porcentaje de composición en el flujo de RCD lo constituye la fracción inerte. Respecto del indicador de categoría a utilizar, este deberá adoptarse según la región donde se realiza la evaluación. Se incluye la presente categoría.
- Impactos por uso del agua: En algunas etapas de gestión de los RCD se consume agua para mitigar el polvo que se genera (por ejemplo plantas de reciclaje de inertes). Sin embargo dada aún la falta de consenso respecto al indicador a utilizar no se incluye la presente categoría.

En la Tabla 5.3 se presenta un resumen de las categorías e indicadores seleccionados según ambos criterios y la decisión final de su inclusión/ exclusión.

**Tabla 5.3** Categorías de impacto seleccionadas para el ACV de la gestión de RCD

Categoría	Criterio 1	Criterio 2	Decisión
Calentamiento global	Si	Si	Incluida
Acidificación	Si	Si	Incluida
Eutrofización	Si	Si	Incluida
Agotamiento de recursos abióticos	Si	Si	Incluida
Oxidación fotoquímica	Si	Si	Incluida
Disminución de la capa de ozono	Si	No	Excluida
Toxicidad humana	Si	Si	Excluida
Ecotoxicidad	No	No	Excluida
Uso del suelo	Si	Si	Incluida
Uso del agua	No	NO	Excluida

*Fuente: Elaboración propia*

En definitiva, han sido seleccionadas seis categorías de impacto para la evaluación de impacto de ciclo de vida de los RCD según los criterios adoptados.

#### **5.4. Indicador de impacto de uso del suelo en tierras secas**

En los distintos continentes, incluso en cada país y más aún, en cada región de un país, el uso del suelo se realiza de manera diferente según las necesidades de la población y la disponibilidad de recursos de cada región o localidad. Por otra parte, frecuentemente no responde a las limitaciones que cada sitio presenta en cuanto a la vulnerabilidad de sus ecosistemas. Debido a ello, los métodos de evaluación de impacto por uso del suelo deben ser adecuados a cada región y sus condiciones físicas, sociales y económicas.

En el caso de las regiones que presentan características de tierras secas, definidas en el Artículo 1° del Texto de la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación como “... *aquellas zonas en las que la proporción entre la precipitación anual (P) y la evapotranspiración potencial (PET) está comprendida entre 0,05 y 0,65, excluidas las regiones polares y subpolares...*,” se ha propuesto recientemente la evaluación de la categoría de impacto por uso del suelo con un indicador de Desertificación. Los criterios generales para caracterizar cada una de estas zonas secas basan en la relación P/PET: a) Ecosistemas hiperáridos, con una relación P/PET < 0.05; b) Áreas áridas, con una relación P/PET entre 0.05 y 0.20; c) Áreas semiáridas, con una relación P/PET entre 0.20 y 0.50; y c) Áreas subhúmedas secas, con una relación P/PET entre 0.60 y 0.65 (UNEP, 1992).

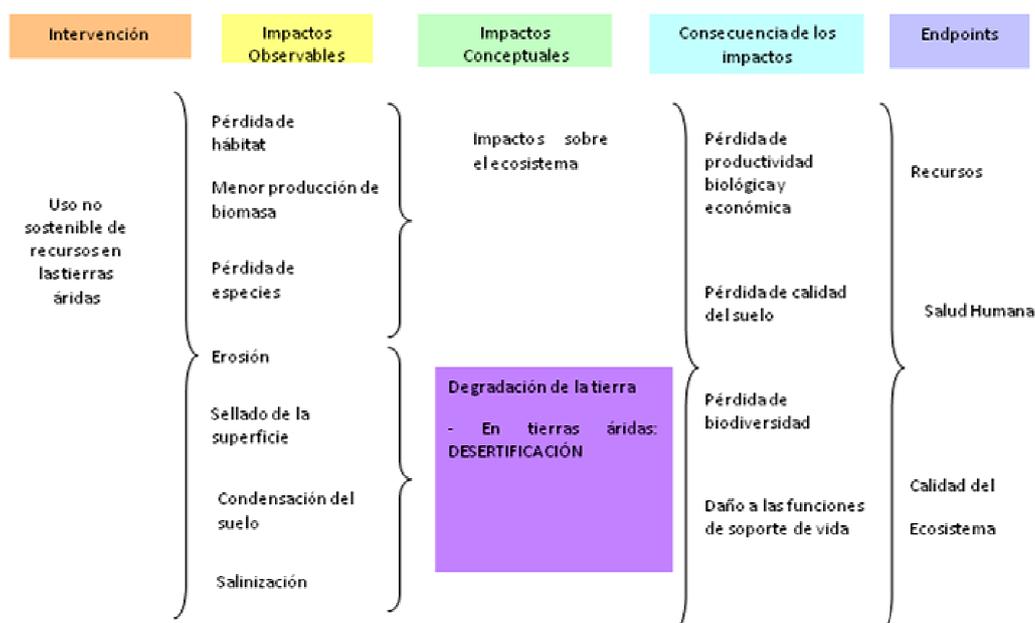
Estas regiones son susceptibles de sufrir degradación a través de un proceso definido por la Soil Conference en Río de Janeiro como desertificación: “*la degradación de las tierras en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas resultante de diversos factores, tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas*”. Existe consenso entre los países de América Latina y el Caribe en la definición de un conjunto de variables que intervienen en el proceso de desertificación.

Cabe señalar que Argentina, país de origen de la presente tesis, es el país de América Latina con mayor extensión de tierras secas, subdivididas en tierras áridas, semiáridas y sub-húmedas secas, representando el 75 % de su territorio. Por este motivo, se ha elegido la aplicación del indicador de categoría de impacto de uso del suelo Desertificación, proceso que tiene importancia en la región centro oeste de Argentina.

Las variables involucradas son consideradas en el modelo desarrollado por Civit, (2009) y se explicarán en los párrafos subsiguientes. Asimismo, en otras regiones debe adoptarse el indicador de impacto que se considere más apropiado.

##### **5.4.1. Conceptos generales de la categoría de impacto Desertificación**

El mecanismo ambiental por el cual se produce el impacto de desertificación se muestra en la Figura 5.2. La intervención ambiental es el “uso no sostenible de los recursos en tierras áridas” causando impactos como pérdida de hábitats, pérdida de especies, erosión, entre otros; es decir, produce impactos sobre los ecosistemas y degrada las tierras secas. Estos impactos observables y conceptuales, tienen como consecuencia la pérdida de productividad biológica y económica; pérdida de la calidad del suelo, pérdida de biodiversidad, pérdida de las funciones de soporte de vida.



**Figura 5.2.** Mecanismo ambiental del proceso de desertificación

*Fuente Civit, (2009)*

En el ACV, los indicadores de uso del suelo deben tener en cuenta la distancia entre los valores actuales y los valores umbral de degradación, y sólo se consideran como indicadores de presión los relacionados con las causas antrópicas, mientras que los indicadores físico-biológicos se tienen en cuenta como indicadores de fragilidad frente a un determinado impacto. Los indicadores para medir el impacto por desertificación deben ser específicos, medibles, alcanzables, relevantes y acotados temporalmente y generalmente se clasifican en cuatro grupos:

- Indicadores de Estado: describen el estado de desertificación en un momento y un tiempo.
- Indicadores de Presión: responden a las causas de desertificación, ejercidos por las acciones humanas.
- Indicadores de Impacto: se refieren a las consecuencias de la degradación de las tierras.
- Indicadores de Respuesta: indican la respuesta de la sociedad y/o las medidas políticas frente al problema de la desertificación.

Tanto los indicadores de estado como los de presión son los que se combinan en la obtención del indicador de categoría de impacto que cuantifica el proceso de Desertificación.

#### **5.4.2. Variables involucradas en el indicador de Desertificación**

El modelo de impacto de desertificación que se aplica en esta tesis, toma en cuenta cuatro variables: tipo de ecosistemas, índice de aridez, cobertura vegetal y balance hídrico superficial. El valor de aridez corresponde a un indicador de estado, y los valores de la cobertura vegetal y el requerimiento de agua del producto o actividad evaluada (que se cuantifica con el balance hídrico superficial), a indicadores de presión antrópica.

La combinación del índice de aridez, la cobertura vegetal y el balance hídrico superficial determinan el estado de referencia de cada uno de los ecosistemas a sufrir desertificación, que en adelante se denominará Factor de Sensibilidad de cada ecosistema (FSe), y el impacto que cada actividad o producto cause en la localidad donde se realice se evalúa también según estas

tres variables, pero para el caso particular que se esté considerando resultando en otro índice, el  $LCI_{Desertificación}$ .

El indicador de desertificación se calcula de acuerdo a la Ecuación 5.9 (Civit, 2009).

$$DP = \left[ \frac{LCI_{Desertificación}}{FSe} \right] \times A_{Actividad} \times t_{Actividad}$$

Ec. (5.9)

*Siendo:*

*DP: Indicador de la categoría desertificación potencial medido en ha-año*

*FSe: factor de sensibilidad de cada ecosistema de referencia*

*A<sub>Actividad</sub> : área ocupada por la actividad evaluada, expresada en unidades de superficie*

*t: es el tiempo que dura la actividad expresado en unidades de tiempo*

La metodología de cálculo de cada variable del  $LCI_{Desertificación}$  y del FSe pueden consultarse en Civit (2009), para la provincia de Mendoza, Argentina.

El índice  $LCI_{Desertificación}$  viene dado por la Ecuación 5.10 y agrupa los datos de ICV de cada sitio específico donde se ubica la actividad.

$$LCI_{Desertificación} = \sum (V_{Aridez} + V_{BceHid} + V_{CobVeg})$$

Ec. (5.10)

*Siendo:*

*V<sub>Aridez</sub>: valor del índice de aridez*

*V<sub>BceHid</sub>: valor (positivo o negativo) de la variable balance hídrico*

*V<sub>CobVeg</sub>: valor de la variable cobertura vegetal*

El valor de la variable “cobertura vegetal” se calcula según la Ecuación 5.11.

$$V_{CobVeg} = CobVegI - CobVegF$$

Ec. (5.11)

*Siendo:*

*CobVegI: Cobertura vegetal inicial*

*CobVegF: Cobertura vegetal final*

Todas estas variables son computadas en el inventario de ciclo de vida correspondiente a la localidad donde se realiza la actividad o se obtiene el producto. Los valores propuestos en este modelo se basan en los programas de lucha contra la desertificación crítica y estudios de desertificación.

El índice de aridez se calcula según la relación entre la precipitación y la evapotranspiración potencial de una región. Por ejemplo, la provincia de Mendoza, en Argentina, tiene tierras secas en toda su extensión, subdivididas entre tierras muy áridas, áridas, semiáridas y sub-húmedas

secas. Los índices de aridez varían entre 0.03 a 0.65. Para la determinación de la variable aridez se utilizan datos suministrados por la estación meteorológica más cercana al sitio de estudio.

La variable balance hídrico superficial está referida a la oferta y demanda de las cuencas que abastecen a los ecosistemas y las actividades que en ellos se realizan. Se toma el valor 1 si es positivo (oferta mayor que la demanda), y 2 si es negativo.

El valor de la variable cobertura vegetal se calcula a partir de imágenes tomadas en visita al campo y procesadas con la aplicación del programa informático CobCal v2.0.0.61® (Ferrari, *et al.*, 2008).

El indicador de desertificación ha sido calculado, a diferencia de otros indicadores, tanto para actividades agrícolas, como para otros proyectos diferentes, tales como plantas de fabricación de ladrillos y urbanización diseñada con pautas bioclimáticas en área rural (Civit, 2009). En los apartados siguientes se analizará su aplicabilidad a la gestión de RCD y su adaptación a la unidad funcional, 1 tonelada de residuo.

### 5.5. Indicador de Desertificación en la gestión de los RCD

La aplicación del indicador de desertificación DP, a la gestión de RCD requiere de datos propios de la región o localidad, en función de los cuales se obtiene el  $FS_e$ . Otros datos corresponden al sitio específico donde se realiza la actividad. Estos son: el valor de cobertura vegetal, el índice de aridez y el valor de balance hídrico superficial. Finalmente, otros dos datos de ICV involucran a la actividad en sí misma: el área ocupada por la actividad y el tiempo estimado de duración de tal actividad.

En el caso de los sistemas de gestión de RCD, y según lo propuesto en el Capítulo 4, las etapas en las que es importante evaluar los impactos por uso del suelo son: la Clasificación, el Reciclaje, la Recuperación de áreas (RA) y el Vertido (VT). En el último caso se aplica además a la evaluación de los vertidos incontrolados, situación que permite compararlos con escenarios de vertidos controlados.

Así, los datos de ICV necesarios para cada una de las etapas mencionadas se organizan en la Tabla 5.4

**Tabla 5.4** Modelo de planilla para datos del ICV del indicador desertificación en SGIRCD

Actividad	Clasificación	Reciclaje	Recuperación de áreas	Vertido
Lugar de la actividad				
Tipo ecosistema				
Factor de sensibilidad $FS_e$				
Área ocupada ( $m^2$ )				
Tiempo de ocupación (años)				
Cálculo $LCI_{Desertificación}$	CobVegI			
	CobVegF			
	$V_{CobVeg}$			
	$V_{BceHid}$			
	Indice de aridez			
	$V_{Aridez}$			

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5.4 hay dos tipos de datos. Los primeros, el  $FS_e$  y el  $LCI_{Desertificación}$ , son adimensionales y dependen de la región y de las características del sitio donde se instalen las plantas de tratamiento y disposición final:

- FSe: para su determinación se requiere localizar la actividad por medio de coordenadas geográficas referenciadas. Estas coordenadas a su vez, permiten identificar el ecosistema que le corresponde y por lo tanto determinar el valor del FSe.
- $LCI_{Desertificación}$ : depende de las tres variables ya mencionadas en el punto 5.3.2 y es específico del sitio.

El segundo tipo de datos, corresponden a magnitudes dimensionales. Con este indicador puede evaluarse el impacto por uso del suelo de la actividad en general, o adaptarlo en cada etapa del SGIRCD a la unidad funcional para que los resultados sean comparables entre alternativas de valorización y o/ disposición final. En los apartados siguientes se establecerán estos conceptos trabajando con las magnitudes dimensionales.

### 5.5.1. Indicador de Desertificación en Plantas de Clasificación y Reproceso de inertes

El factor  $A_{Actividad}$  de la Ecuación 5.9, como ya se mencionó, se refiere a la superficie (en  $m^2$ ) necesaria para el desarrollo de la actividad evaluada. En el caso de las PCRI es directamente el área afectada a la actividad. En cuanto al  $t_{Actividad}$  se requiere establecer un tiempo de funcionamiento de la instalación. En este caso, se recomienda tomar el periodo de vida útil de la misma determinado por su obsolescencia o por la durabilidad de las instalaciones en sí mismas. Por ejemplo, Coelho *et al.* (2013a) considera 60 años; Mercante *et al.* (2009b) 30 años. Conocidas estas magnitudes, basta con aplicar la Ecuación 5.9 para obtener un valor del DP, medido en ha-año.

La expresión del DP referida a PCRI se indica en la Ecuación 5.12.

$$DP_{PCRI} = \left[ \frac{LCI_{Desertificación}}{FSe} \right] \times A_{Actividad\ PCRI} \times t_{PCRI}$$

Ec. (5.12)

Sin embargo, dado que la unidad funcional en la PCRI es la gestión 1t de RCD, no es suficiente con establecer un valor de superficie ocupada por las instalaciones, sino que es necesario además referirla a dicha funcional, sobre todo para fines comparativos (por ejemplo, reciclaje versus vertido).

En general, se plantean dos casos. En el primero de ellos se asume que la etapa se evalúa para la gestión de una cantidad de RCD generada durante un año en una localidad dada y que la planta funciona sólo para esa cantidad. La expresión de cálculo del factor  $A_{Actividad}$  referida a la unidad funcional y para PCRI a incluir en la Ecuación 5.12 se propone en la Ecuación 5.13.

$$A_{Actividad\ PCRI,t} = \frac{A_{Actividad}}{Ca \times \delta}$$

Ec. (5.13)

Siendo:

$A_{Actividad\ PCRI,t}$ : área afectada a la actividad PCRI, correspondiente a 1 t de residuo ( $m^2/t$ )

$Ca$ : Cantidad de RCD a procesar ( $m^3$ ) en un año

$\delta$ : densidad del residuo RCD ( $t/m^3$ )

En este caso el  $t_{Actividad}$  debe adoptarse de 1 año, considerando que esa cantidad de RCD se procesa y la actividad finaliza, en ese tiempo. La expresión final para el DP se expresa en la Ecuación 5.14.

$$DP_{PCRI,t1} = \left[ \frac{LCI_{Desertificación}}{FSe} \right] \times \frac{A_{Actividad}}{Ca \times \delta} \times 1$$

Ec. (5.14)

Siendo  $DP_{PCRI,t1}$  el indicador de desertificación potencial de PCRI para 1 tonelada de RCD para el primer caso.

Ahora bien, otro caso a considerar es si la PCRI procesa RCD de varias localidades. Se podría asumir que la planta funciona al máximo de su capacidad para la cantidad de RCD de una localidad evaluada y entonces el  $t_{Actividad}$  para la PCRI y para 1 t de residuo se puede calcular para esa cantidad según la Ecuación 5.15.

$$t_{PCRI,t} = \frac{Ca \times \delta}{Cp} \frac{1}{365}$$

Ec. (5.15)

Siendo:

$t_{PCRI,t}$ : tiempo de la actividad PCRI, correspondiente a 1 t de residuo (año/t)

$Cp$ : Capacidad de tratamiento diario de la PCRI (t/día)

$\delta$ : densidad del residuo RCD (t/m<sup>3</sup>)

En este caso la Ecuación 5.12, teniendo en cuenta la Ecuación 5.13 y Ecuación 5.15 adoptaría la forma de la Ecuación 5.16.

$$DP_{PCRI,t2} = \left[ \frac{LCI_{Desertificación}}{FSe} \right] \times \frac{A_{Actividad}}{Cp \times 365}$$

Ec. (5.16)

Siendo  $DP_{PCRI,t2}$  el indicador de desertificación potencial de PCRI para 1 tonelada de RCD para el segundo caso.

Los mismos análisis podrían hacerse para evaluar el impacto por uso del suelo en plantas de reciclaje de fracciones distintas a las inertes. La dificultad estará en la consecución de datos de inventario para cada una de las plantas específicas: madera, metales, plásticos, cartón-papel.

### 5.5.2. Indicador de Desertificación en Recuperación de áreas y Vertido

En el caso de la recuperación de áreas (RA) y vertido (VT) (controlado o incontrolado) el cálculo de la magnitud  $A_{Actividad}$  referida a la unidad funcional se propone en la relación expresada en la Ecuación 5.17.

$$A_{Actividad:RA-VT,t} = \frac{A_{Actividad}}{Vv \times \delta}$$

Ec. (5.17)

Siendo:

$A_{Actividad:RA-VT,t}$ : área afectada a la actividad RA, correspondiente a 1 t de residuo (m<sup>2</sup>/t)

$V_v$ : Volumen del vaso del área a recuperar, del vaso del vertedero o del vertido incontrolado ( $m^3$ )

$\delta$ : densidad del residuo RCD ( $t/m^3$ )

Para todos los casos (RA y VT) el  $A_{Actividad,t}$  se hace mayor cuanto menor es la altura media del vertido (por la relación volumen/área). Por lo tanto si se resolviera disponer los residuos en depósitos en terreno (RA ó VT), para un mismo volumen conviene construirlos con la mayor altura posible a fin de disminuir el impacto por el uso del suelo, según este indicador de Desertificación.

En cuanto al  $t_{Actividad}$  en el caso de la recuperación de áreas (RA) y vertido (VT), este tiempo es la vida útil de la instalación, puesto que el RCD depositado permanecerá en el lugar a diferencia de las PCRI en que el RCD se trata y se deriva como materia prima para otros procesos. Se puede adoptar como  $t_{Actividad}$  el periodo de explotación del mismo, es decir desde su construcción hasta el cierre y re inserción. Este periodo será variable según la celeridad con que se ejecute el relleno, y dependerá del ritmo de generación de RCD.

Otra situación que puede presentarse es determinar el periodo que dura la actividad en los vertidos ilegales. Una opción en este caso es considerar la frecuencia con que se sanean estos sitios de acuerdo a datos de los agentes municipales, por ejemplo o recurrir a consultas para conocer la edad de la actividad.

Las Ecuación 5.18, indica la expresión de cálculo del indicador de desertificación para el caso de RA y VT por tonelada de RCD dispuesta en terreno.

$$DP_{RA-VT,t} = \left[ \frac{LCI_{Desertificación}}{FSe} \right] \times \frac{A_{Actividad}}{V_v \times \delta} \times t_{Actividad} \quad \text{Ec. (5.18)}$$

Siendo  $DP_{RA-VT,t}$  el indicador de desertificación potencial de RA y VT para 1 tonelada de RCD.

Una cuestión a tener en cuenta es que, en cuanto a impactos por uso del suelo se refiere, el indicador DP se propone tomarlo con valor negativo en aquellos casos que el depósito en terreno sea con objetivos de Recuperación de áreas. Esto es por el impacto beneficioso que significa.

### 5.5.3. Caso de aplicación en Las Heras, Mendoza.

Con el fin de aplicar y validar el cálculo del impacto por uso del suelo, se presenta el estudio de un caso local en Mendoza (Argentina), por aplicación del indicador de desertificación a sitios de vertido incontrolado. En estos casos se aplicarán las Ecuaciones 5.9 y 5.18 para el cálculo.

#### 5.5.3.1. Antecedentes y descripción del caso

En la provincia de Mendoza la gestión de RCD se reduce a las actividades de recogida, transporte y disposición final. Esta última, se realiza en terreno, y muy frecuentemente en sitios no controlados. Esta práctica, favorecida por la ausencia de una normativa y vigilancia estatal adecuadas, trae como consecuencia efectos negativos sobre distintos factores del ambiente. Por otra parte, se evidencia un uso ineficiente de los materiales y energía al abandonarse los RCD sin posibilitar acciones de valorización.

En todos los departamentos de la provincia se manifiesta una situación similar, pero se analiza el caso de Las Heras debido a que se cuenta con el diagnóstico de un proyecto de investigación en el cual se participó. En dicho proyecto se efectuó un relevamiento planimétrico de sitios de vertido incontrolado de RCD y una caracterización cuali-cuantitativa de los mismos (Mercante *et al.*, 2009). Los resultados permitieron confeccionar cartas ambientales que representan la magnitud del problema y los riesgos asociados a la degradación de los recursos naturales. A modo de ejemplo, una de las cartas se presenta en la Figura 5.3. El área de estudio de este trabajo coincidió con la superficie del Departamento de Las Heras incluida en el área metropolitana de Mendoza.

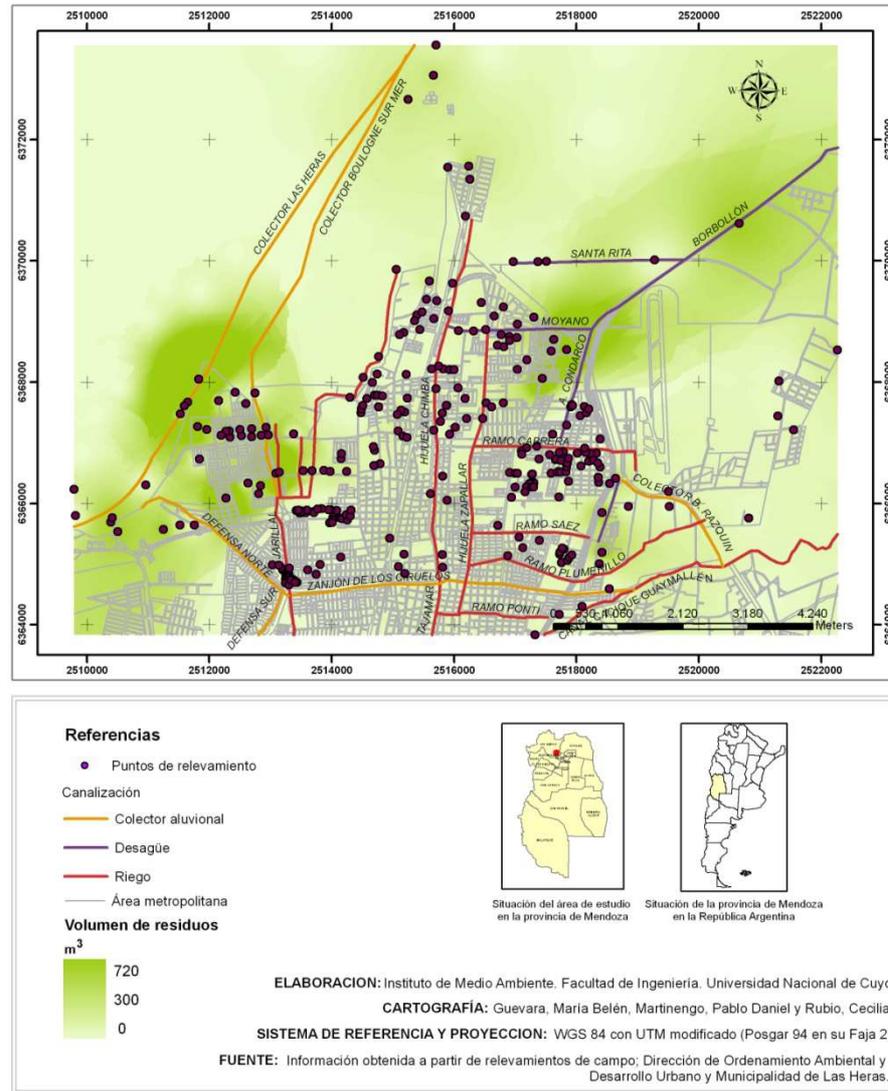
La cantidad total de puntos relevados asciende a 297, siendo consistente y representativo el censo efectuado, ya que se consideró toda el área urbana y suburbana del departamento de Las Heras. El mayor número de sitios identificados corresponde a lotes baldíos de áreas residenciales sin cierre perimetral, que se convierten en sitios muy vulnerables al depósito de residuos. Esta situación se debe al crecimiento desordenado del área urbana, que ha dejado vacíos o huecos urbanos con superficies entre 200-500 m<sup>2</sup>. Sobre estos sitios el municipio realiza campañas de limpieza periódicas. En menor cantidad se encuentran grandes depósitos de RCD que requieren de planes de cierre y recuperación.

Se mantuvo entrevistas con el responsable del Departamento de Gestión Ambiental del Municipio. Según se informa en este Departamento, la gestión de los RCD compete al municipio tanto en obras menores como mayores. No se ha promulgado aún una ordenanza específica acerca de la gestión de estos residuos. El único sitio autorizado por el municipio para la disposición final de los RCD es el vertedero de residuos sólidos urbanos localizado en El Borbollón, pero salvo que las empresas requieran un certificado de eliminación de residuos, no se registran transportes hacia el lugar, según una consulta realizada al gerente de la empresa concesionaria.

El municipio organiza con el área de Servicios Públicos campañas de limpieza de los sitios incontrolados de vertido en periodos de tiempo irregulares que significan un alto costo de carga y transporte. Esto implica siempre una gestión correctiva. Dadas estas condiciones es que se manifiesta la necesidad urgente de controlar la situación descripta e implementar acciones preventivas.

El municipio recoge además los residuos de obras menores que van mezclados con residuos de poda. Según datos de Servicios Públicos se recolectan entre 24000- 28000 tn/año. Estos son depositados en el vertedero El Borbollón. (Datos correspondientes a los años 2006 y 2007 respectivamente).

Con el fin de evaluar el efecto de desertificación, objetivo de este estudio de caso, se analizaron los 297 sitios relevados. Se descartaron aquellos que correspondían a terrenos urbanos baldíos de dimensiones menores, entre 200 m<sup>2</sup> -500 m<sup>2</sup> por ser sitios ya impactados por la propia urbanización, y no específicamente por la disposición de cantidades pequeñas de RCD (estimadas entre 1 y 3 m<sup>3</sup>). En estos casos generalmente los RCD provenían de remodelaciones de casas vecinas, lo que se ha definido en esta tesis como “obra menor”. De esta selección resultaron solo 28 sitios a evaluar.



**Figura 5.3.** Volumen de vertido en relación a los cauces de riego y desagüe  
 Fuente: Mercante, et al., (2009)

Una segunda selección los dividió en depósitos de RCD de tipo “superficial” y depósitos de RCD “en altura”. Esta clasificación se realizó por observación de las fotografías y la descripción cualitativa de cada sitio. Los sitios de tipo “superficial” se caracterizan por presentar disposición de RCD esparcidos en el terreno, con muy baja altura (< 50 cm), tal como se ilustra en la Figura 5.4. En tanto, los sitios “en altura” corresponden a acopios de mayor envergadura, con alturas mayores ( $\geq 50$  cm) como se ilustra en la Figura 5.5.

El primer grupo de sitios, de tipo superficial, fue dejado de lado en el estudio, debido a que su revegetación es sencilla en forma natural y no se presenta toda la superficie cubierta por RCD, minimizándose así los efectos por desertificación.



**Figura 5.4.** Vertido incontrolado de RCD de tipo superficial  
*Fuente: Elaboración propia*



**Figura 5.5.** Vertido incontrolado de tipo “en altura”  
*Fuente: Elaboración propia*

Del segundo grupo, se reunieron 19 sitios con depósitos importantes de RCD, donde los efectos por el uso del suelo se presumió eran más significativos. Dado que la consecución de los datos de inventario de la disposición incontrolada es un trabajo costoso se eligieron cinco de estos sitios, mediante un muestreo aleatorio sin reposición. El intervalo de confianza para las medias estimadas de los parámetros medidos (superficie y volumen) se obtuvo a través de una distribución t-Student.

### 5.5.3.2. Definición de objetivos y alcance

Se planteó como objetivo para este estudio evaluar el impacto ambiental por uso del suelo de sitios de vertido incontrolado de RCD en el área urbana y periurbana del Departamento de Las Heras. Para ello se utiliza el modelo de evaluación del indicador de desertificación, DP.

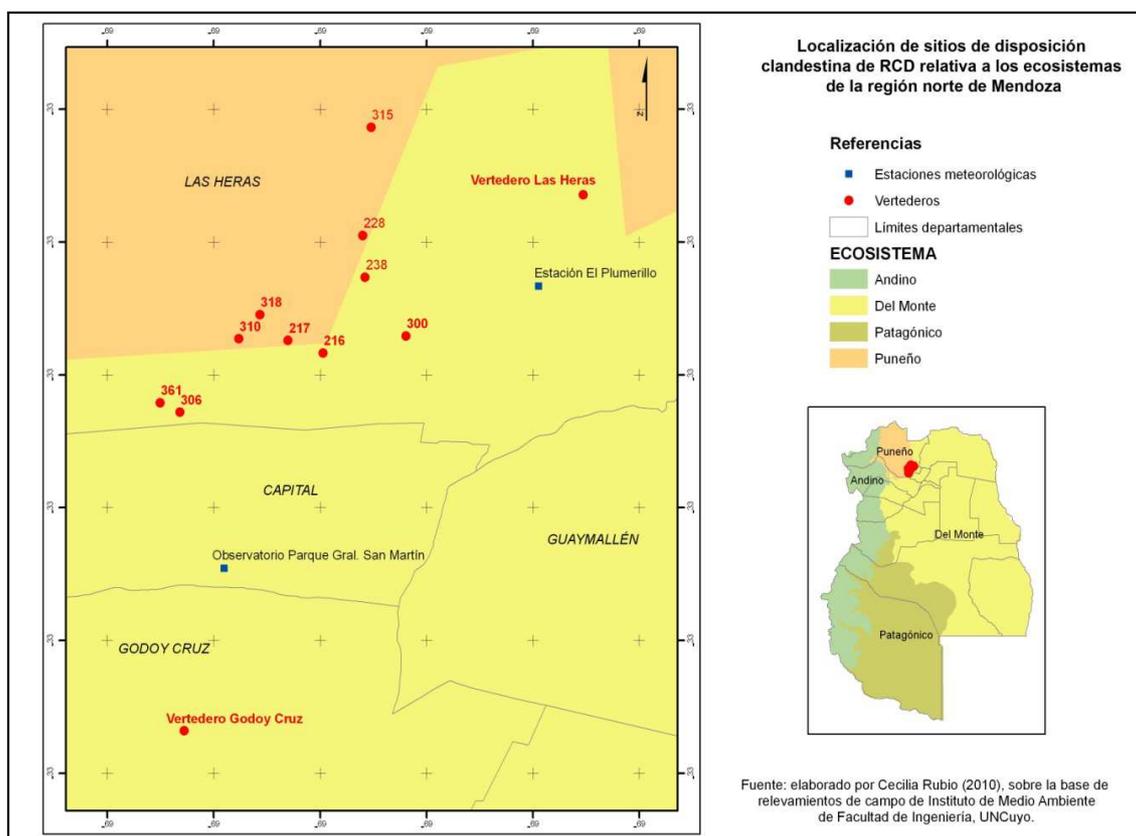
Se definió como unidad funcional para este trabajo, la disposición incontrolada de 1 t de RCD.

### 5.5.3.3. Datos de inventario de ciclo de vida

La obtención de los datos de inventario a los fines del indicador de desertificación se realizó según el detalle que se describe a continuación:

- Lugar de la actividad y tipo de ecosistema

La definición de la localización geográfica de cada uno de los cinco sitios seleccionados permitió identificar el ecosistema al que pertenecen, y seguidamente la asignación del factor de sensibilidad (FSe) correspondiente. En la Figura 5.6 se señalan varios sitios por puntos rojos, siendo los analizados aquellos indicados con el número 217, 228, 306, 315 y 361, en adelante Casos 1 a 5.



**Figura 5.6.** Localización de sitios de disposición incontrolada de RCD

Fuente: *Elaboración propia*

La Tabla 5.5 indica para cada uno el Distrito departamental en el que se ubican, la zona que corresponde de acuerdo a la ordenanza de ordenamiento territorial del departamento Las Heras, la localización con coordenadas (latitud y longitud), el ecosistema al cual pertenecen y el factor de sensibilidad del ecosistema.

**Tabla 5.5** Datos de localización de los sitios seleccionados

Caso analizado	Distrito	Ordenamiento territorial	Coordenadas		Ecosistema	FSe
			Latitud	Longitud		
Caso 1	El Challao	residencial especial	-32,84067641	-68,85708016	Puneño	7
Caso 2	El Resguardo	residencial especial	-32,81616831	-68,83918497	Puneño	7
Caso 3	El Challao	residencial mixta	-32,8574051	-68,88295367	Del Monte	7
Caso 4	Capdevilla	industrial nociva	-32,79094708	-68,83719101	Puneño	7
Caso 5	El Challao	residencial mixta	-32,85518565	-68,88772951	Del Monte	7

Fuente: Elaboración propia

- Índice de aridez

Para la determinación del índice de aridez del lugar se consideraron los datos suministrados por el Servicio Meteorológico Nacional para las estaciones de Aeropuerto Internacional El Plumerillo, en los casos 1,2 y 4; y Observatorio Parque General San Martín para los casos 3 y 5. La Figura 5.6 indica los resultados obtenidos.

**Tabla 5.6** Índice de aridez de la localidad

Caso analizado	Índice de Aridez	Tipo de ecosistema	$V_{Aridéz}$
Caso 1	0,047	muy árido	4
Caso 2	0,047	muy árido	4
Caso 3	0,054	árido	3
Caso 4	0,047	muy árido	4
Caso 5	0,054	árido	3

Fuente: Elaboración propia

- Cobertura vegetal

El cálculo del valor de la variable  $V_{CobVeg}$  se realizó para cada sitio a partir de datos recopilados en campo. Para ello se realizaron campañas en las que se tomaron fotografías de la cobertura vegetal en las adyacencias a los depósitos de RCD (áreas no impactadas) y se procesaron con el programa informático CobCal v2.0.0.61© (Ferrari, *et. al*, 2008). Como resultado del procesamiento se obtiene un porcentaje de cobertura vegetal por unidad de superficie (1 m<sup>2</sup>). Este valor es el nombrado como  $CobVegI$  (Cobertura vegetal inicial) al que le corresponde una clase de acuerdo a las especificaciones del modelo aplicado (Civit, 2009). El valor correspondiente al  $CobVegF$  (Cobertura vegetal final) será de 0%, dado que los depósitos de RCD impiden el crecimiento de la flora. En este caso la clase de la cobertura vegetal final será, en todos los casos, de valor 6. La Tabla 5.7 resume los datos obtenidos y los cálculos realizados.

**Tabla 5.7** Factor de cobertura vegetal de cada actividad

Caso analizado	Cobertura Vegetal	Promedio	Clase ( % Intervalo)		$V_{CobVeg}$
Caso 1	21% 24%	26%	5 (15-30%)	6 (0-15%)	1
Caso 2	64% 55%	51%	3 (45-60%)	6 (0-15%)	3
Caso 3	69% 49%	42%	4 (45-60%)	6 (0-15%)	2
Caso 4	20% 50%	33%	4 (30-45%)	6 (0-15%)	2
Caso 5	41% 44%	40%	4 (30-45%)	6 (0-15%)	2

Fuente: Elaboración propia

- Índice de balance hídrico

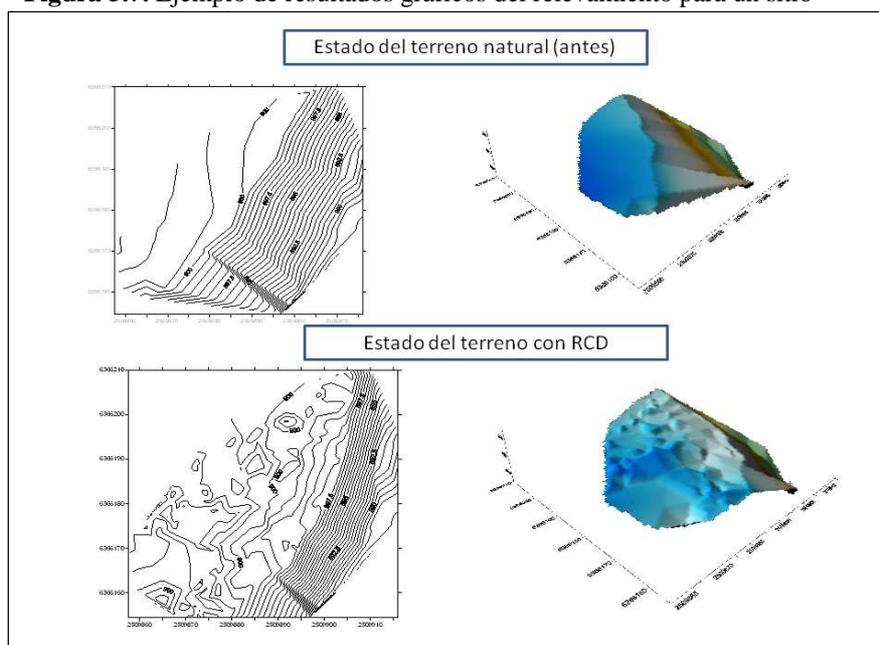
El índice de balance hídrico se ha tomado igual a 1 en todos los casos, dado que la actividad disposición incontrolada de RCD no demanda consumo de agua.

- Área y volumen de la actividad

El área de la actividad y el volumen de los RCD depositados se obtuvieron a través de un relevamiento planialtimétrico. Para esta tarea se contó con la colaboración del Agr. Guillermo Reta, Agr. Pedro Royo, un ayudante alumno: Pablo Martinengo y un guardia policial.

La metodología de trabajo consistió en la “comparación entre el “estado del terreno natural y el estado del terreno después de la disposición de RCD”. Debe entenderse como “estado del terreno natural” el que se determinó según las adyacencias del depósito de RCD existente, donde no hubo depósito de material a la fecha del levantamiento. Se efectuó un reconocimiento del área de trabajo con el objeto de determinar el criterio de relevamiento. Los informes completos se adjuntan en el Anexo I de esta tesis. Solo a título ilustrativo se indican en la Figura 5.7, los resultados gráficos del relevamiento realizado sobre el Caso 5, identificado con el número 361. La Tabla 5.8 indica los valores obtenidos de área y volumen de la actividad.

**Figura 5.7.** Ejemplo de resultados gráficos del relevamiento para un sitio



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 5.8** Área y volumen de la actividad en cada caso

Caso analizado	Volumen $V_v$ ( $m^3$ )	$A_{Actividad}$ (ha)
Caso 1	598	0,1647
Caso 2	917	1,2409
Caso 3	781	0,3186
Caso 4	813	0,3434
Caso 5	2307	0,1837

*Fuente: Elaboración propia*

La estimación de la media de los parámetros medidos con una distribución t-student se presenta en la Tabla 5.9. Estos valores permiten obtener una idea de la envergadura del problema considerando que son 19 los sitios identificados.

**Tabla 5.9** Intervalo de confianza para la media del área y volumen de los depósitos de RCD

Probabilidad	Cuantil	Intervalo de confianza	
		Volumen ( $m^3$ )	Área (ha)
95%	2,7764	713- 1564	2781- 6223
90%	2,1318	601-1564	1386-7619

*Fuente: Elaboración propia*

Tomando un intervalo de confianza de 90%, se puede estimar el volumen depositado entre un mínimo de  $11.419 m^3$  y un máximo de  $29.716 m^3$ . Asimismo para el área afectada se estima entre 2,63 y 14,5 has. Como se ve los márgenes son muy amplios debido a la poca cantidad de muestras. Si se quiere acotar los valores se debería relevar más sitios, estudio que quedó fuera del alcance de esta tesis.

- Tiempo de la actividad

El tiempo de la actividad es una magnitud difícil de determinar en vertidos incontrolados, por lo que adoptó de acuerdo a consultas municipales sobre la duración de los vertidos. En el caso de los vertidos localizados en áreas residenciales especiales o mixtas, se consideró 20 años. En el caso del sitio ubicado en área industrial nociva, se adoptó un periodo de 30 años, en la suposición de que por el tipo de uso del suelo se mantenga como un área de disposición activa por un periodo mayor. En la Tabla 5.10 se indican los valores considerados.

Por último, fue necesario adoptar un valor de densidad de RCD, que interviene en la Ecuación 3.18. Se adoptó un valor de  $980 kg/m^3$  de acuerdo a consultas a empresas transportistas de RCD, y considerando que en todos los casos los RCD se disponen sin ningún tipo de compactación.

- Resumen del inventario de ciclo de vida

La Tabla 5.10 muestra los datos recopilados que son empleados en la etapa siguiente de evaluación del Impacto del ciclo de vida.

**Tabla 5.10** Datos del ICV de cada caso de vertido incontrolado analizado

Identificación del sitio	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
Tipo ecosistema	Puneño	Puneño	Del Monte	Puneño	Del Monte
Factor de sensibilidad, FS <sub>e</sub>	7	7	7	7	7
Área actividad (ha)	0,1647	1,2409	0,3186	0,3434	0,1837
Volumen de RCD (m <sup>3</sup> )	598	917	781	813	2307
Tiempo actividad (años)	20	20	20	30	20
Cobertura vegetal inicial	5	3	4	4	4
Cobertura vegetal final	6	6	6	6	6
$V_{CobVeg}$	1	3	2	2	2
$V_{BceHid}$	1	1	1	1	1
Índice de aridez	0,047	0,047	0,054	0,047	0,054
$V_{Aridez}$	4	4	3	4	3
LCI	6	8	6	7	6

Fuente:  
Elaboración propia

#### 5.5.3.4. Evaluación del impacto del ciclo de vida

Se presenta en la Tabla 5.11 los valores de indicadores de desertificación de la actividad vertido incontrolado para los cinco casos. En la segunda columna se presentan los resultados utilizando la Ecuación 5.9, y en la tercera, los mismos valores referidos a la unidad funcional, 1 t de RCD, calculados por aplicación de la Ecuación 5.18 propuesta en esta tesis. La cuarta columna indica la relación volumen/área de cada depósito analizado.

**Tabla 5.11** Cálculo del Indicador de desertificación de la actividad

Casos analizados	DP (ha-año)	DP <sub>VT,t</sub> (ha-año)	$Vv / A_{Actividad}$ (m)
Caso 1	2,82	4,82E-03	0,36
Caso 2	28,36	3,16E-02	0,07
Caso 3	5,46	7,14E-03	0,25
Caso 4	10,30	1,29E-02	0,24
Caso 5	3,15	1,39E-03	1,26

Fuente: Elaboración propia

Los cálculos presentados en la segunda columna permiten observar una gran diferencia entre los distintos casos. Este hecho se explica por la influencia del porcentaje de cobertura vegetal y al área ocupada por los sitios que son también de magnitudes muy variadas.

En relación a los resultados expresados en la tercer columna, tres valores presentan un orden de magnitud de  $10^{-3}$  y dos de ellos de  $10^{-2}$ .

#### 5.5.3.5. Interpretación de resultados

Los valores del DP del vertido incontrolado referidos a la unidad funcional resultan más homogéneos que los de la “actividad”. Este hecho confirma la propuesta de utilizar estos valores en la evaluación del impacto y no los de la “actividad”.

Por otra parte, cabe señalar que el DP se hace mayor cuanto menor es la altura equivalente del vertido (relación volumen/superficie). Por lo tanto si se resolviera disponer los residuos en depósitos en terreno (vertedero controlado), convendría construirlos con la mayor altura posible a fin de disminuir el impacto por el uso del suelo. Así, por ejemplo en los casos 1, 2, 3 y 5, que tienen un mismo periodo de duración de la actividad, se evidencia esta interpretación.

A los fines de la evaluación ambiental del estudio de caso presentado, de vertido incontrolado, el Indicador de desertificación arrojó valores absolutos que deberán compararse con alternativas de gestión, tales como el reciclaje, vertido controlado, entre otras, a fin de argumentar la decisión de su correcto manejo.

## 5.6. Conclusiones del Capítulo

La selección de categorías de impacto realizada en este Capítulo para su aplicación a la evaluación ambiental de SGIRCD, se ha realizado a partir de criterios que tienen en cuenta el uso de categorías globales convencionales, las categorías utilizadas en otros sistemas de gestión de residuos sólidos, pero fundamentalmente se ha tenido en cuenta el tipo de actividad y las características de los residuos a gestionar.

Asimismo se destaca la importancia de regionalizar las categorías y los indicadores de categorías, esto es, la adopción de aquellos que sean representativos para la región donde se lleva a cabo el análisis del SGIRCD, tal es el caso del indicador de impacto por uso del suelo en tierras secas elegido. En este caso se propone además la adaptación del Indicador de desertificación al caso de la actividad particular estudiada, la gestión de 1 t de RCD.

Los resultados del cálculo de DP para la actividad de vertido incontrolado, muestran valores absolutos del impacto ambiental por desertificación que son útiles al momento de decidir entre otras opciones controladas de gestión de RCD.

# Capítulo 6. DISEÑO DE LA HERRAMIENTA INFORMÁTICA ACV-RCD

---

## **Resumen**

Con base en la metodología de evaluación ambiental de SGIRCD desarrollada en el Capítulo 4, se ha diseñado una herramienta informática denominada ACV-RCD. En este capítulo se explica cómo se diseñó la herramienta, se indican sus condiciones y requerimientos, se realiza una descripción de la misma, se explican sus funciones y utilidades, así como también su alcance y limitaciones. En los casos necesarios se presentan las tablas de datos y referencias que apoyan las suposiciones o el uso de datos preestablecidos y genéricos. Se indica cómo se presentan los resultados y su interpretación.

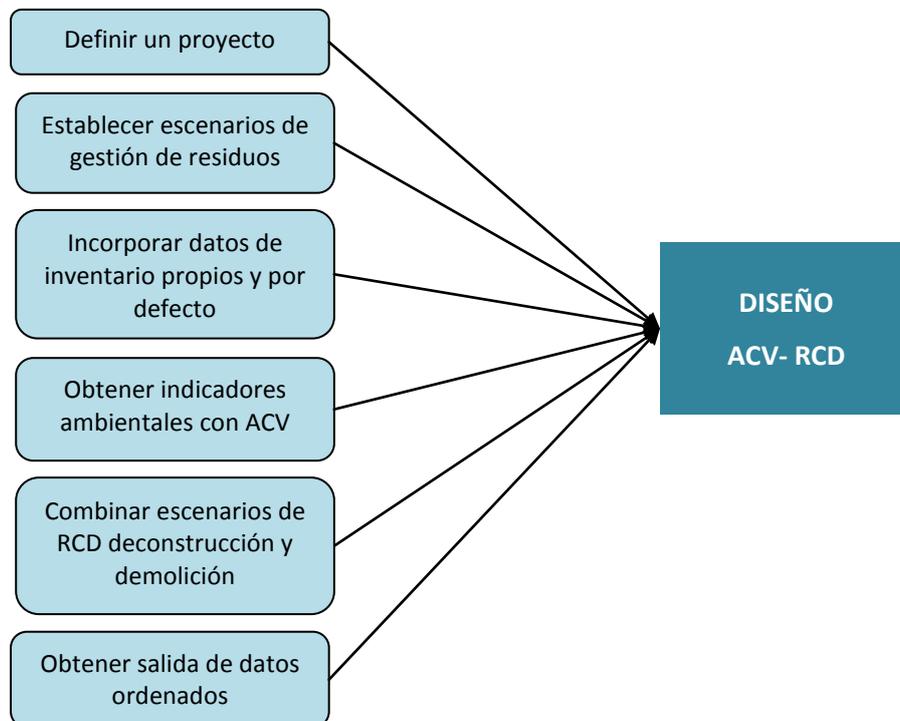
### **6.1. Diseño conceptual de la herramienta**

La metodología desarrollada en el Capítulo 4 para la evaluación de un SGIRCD o sus etapas, requiere de la recopilación de datos de inventario y cálculos complejos que dificultan su aplicación. El objetivo que se persigue en este capítulo de la tesis es diseñar una herramienta informática que permita calcular, por aplicación de la metodología de análisis de ciclo de vida ACV, las cargas ambientales de cada una o todas las etapas de un Sistema de Gestión Integral de RCD (SGIRCD). De este modo, se propone componer en un único esquema a través de la herramienta, denominada ACV-RCD, las etapas del ciclo de vida del SGIRCD desarrolladas teóricamente en el Capítulo 4.

Se estableció como requerimiento básico que la herramienta posibilite, a partir de los datos de inventario que incorpora, realizar las fases de clasificación y caracterización de la etapa de evaluación del impacto del ciclo de vida de la metodología ACV, de acuerdo a los elementos obligatorios marcados por norma ISO 14040-14044, (2006), tal como se indica en la Figura 1.12, del Capítulo 1.

Conceptualmente, la herramienta ACV-RCD debe ser capaz de componer las funciones que se indican en la Figura 6.1. Las premisas generales aplicadas a su diseño se detallan a continuación, siendo necesario que ACV-RCD permitiera:

- Definir el proyecto de gestión de RCD bajo estudio, sus objetivos, descripción y datos generales.
- Establecer escenarios de gestión diversos en base a dos escenarios básicos que contemplan la recogida selectiva y no-selectiva de RCD en obras civiles.
- Incorporar datos de inventario propios, es decir, ser flexible a las condiciones regionales del sitio donde se realiza la evaluación ambiental, al tipo de proyecto de gestión de RCD considerado (construcción o demolición) y a las características de las instalaciones involucradas. Asimismo, debe ofrecer datos de inventario por defecto.
- Obtener indicadores ambientales que permitan determinar el perfil ambiental del escenario de gestión de RCD bajo análisis. Los indicadores ambientales deben de poder desglosarse según las etapas de gestión.
- Combinar escenarios en relación al origen de los RCD, según sean obras de demolición o construcción. Esta condición se establece en función de que la obra que da origen al residuo condiciona la composición de los RCD, y por tanto, las posibilidades de gestión.
- Adquirir una salida que resuma y contenga los datos generales del proyecto y los resultados en formato Excel<sup>®</sup>.



**Figura 6.1** Premisas generales de la herramienta ACV-RCD

## 6.2. Condiciones y requisitos de la herramienta

En los párrafos que siguen se detallan las condiciones y requisitos específicos de la herramienta que se establecieron para optimizar su operatividad y funcionamiento. De este modo, en cada subtítulo se comentan los requerimientos impuestos antes de la elaboración del programa informático.

### 6.2.1. Condiciones en relación a las fracciones de residuo consideradas

Las fracciones de residuos consideradas en la herramienta ACV-RCD se seleccionaron luego de analizar distintas composiciones en varias regiones y de acuerdo a las fracciones indicadas en la Tabla 3.1 del Capítulo 3.

Respecto de la fracción de RCD inerte, se incluyó una correspondiente a inertes mezclados (IM) (ladrillos, revestimientos, losetas, tejas, pétreos, hormigón, morteros, tierras) y otra a una fracción compuesta por sólo RCD de hormigón (IH). Esto es debido a que existen plantas de reproceso de la fracción IN exclusivas para cada uno de los casos considerados. También se ha incluido una fracción correspondiente a concretos asfálticos (CA), que puede utilizarse en la gestión de RCD de obras viales.

El vidrio (VD), también inerte, a los efectos de analizar su reproceso individual, se consideró por separado.

De la fracción de RCD no-especiales (N-Es), se ha incluido la madera (MD), el cartón-papel (CP), los plásticos mezclados (PL) y el yeso (YS). Respecto de la fracción de metales (MT), dado que, en general, la fracción de MT no-ferrosos es muy pequeña en relación a los ferrosos, se ha considerado como una única fracción y bajo la característica de ferrosos.

Los residuos especiales (Es) no se incluyen en este sistema por el hecho de que se gestionan bajo legislación y operadores especialmente registrados. Por otra parte, presentan un bajo porcentaje de participación en la composición. Por lo tanto, las cantidades de cada fracción a ingresar deben referirse siempre sin considerar los RCD Es.

Finalmente, se requiere una fracción denominada Rechazo. Esta última engloba todos los RCD no incluidos en las categorías seleccionadas, a excepción de los RCD Es.

A los fines de considerar la recogida no-selectiva, se ha incluido además un tipo de RCD mixtos, denominada como “Total”. Esta última también excluye los RCD Es.

En síntesis, la Tabla 6.1 muestra las fracciones incluidas.

**Tabla 6.1** Fracciones de RCD incluídas en ACV-RCD

Tipo	Fracción	Nomenclatura
Inertes (IN)	Inerte mezclado	IM
	Hormigón	IH
	Asfalto	CA
	Vidrio	VD
No especiales (N-Es)	Madera	MD
	Cartón-Papel	CP
	Plásticos	PL
	Metales	MT
	Yeso	YS
Rechazo	Varias	Re
Mixtos	Todas	Total

Se requirió establecer un elemento de control a los fines de que el porcentaje sume 100% y no permita inducir errores.

### 6.2.2. Condiciones determinadas por los esquemas de recogida

La herramienta ACV-RCD debía posibilitar al usuario establecer distintos esquemas de recogida de residuos. Las principales combinaciones entre tipos de contenedores y fracciones residuales empleadas en distintas regiones debían encontrarse dentro del conjunto de esquemas de recogida que es posible evaluar ambientalmente. Así pues, la herramienta a desarrollar consideraría la recogida separada de las fracciones: CP, VD, MT, MD, PL, YS, IM, IH, CA y Re. Los esquemas de recogida modelados en los escenarios debían de poder contar con un único contenedor (Total) o varios contenedores por fracciones simultáneamente.

La Tabla 6.2 indica las asociaciones posibles de contenedores y fracción residual que se seleccionaron para el programa. Se introducen tanto contenedores de recogida interna en obra (contenedores de 90 l) como aquéllos que recogen los camiones de transporte de RCD y los trasladan desde la obra civil donde se generan, a planta de clasificación, planta de reproceso o vertedero (sacos de rafia y contenedores de 3 m<sup>3</sup>, 5 m<sup>3</sup>, 8 m<sup>3</sup> y 20 m<sup>3</sup>).

**Tabla 6.2** Relación Tipo de contenedor- Fracción RCD en etapa Recogida

Recogida selectiva	
Fracción RCD	Contenedores
inerte	Sacos de rafia de 1 m <sup>3</sup> Contenedor de 3 m <sup>3</sup> Contenedor de 5 m <sup>3</sup> Contenedor de 8 m <sup>3</sup>
yeso	Contenedor de 90 l Sacos de rafia de 1 m <sup>3</sup> Contenedor de 3 m <sup>3</sup> Contenedor de 5 m <sup>3</sup> Contenedor de 8 m <sup>3</sup>
vidrio	Contenedor de 90 l Contenedor de 3 m <sup>3</sup> Contenedor de 5 m <sup>3</sup>
plástico	Contenedor de 90 l Contenedor de 5 m <sup>3</sup> Contenedor de 20 m <sup>3</sup>
cartón-papel	Contenedor de 90 l Contenedor de 5 m <sup>3</sup> Contenedor de 20 m <sup>3</sup>
madera	Contenedor de 90 l Contenedor de 5 m <sup>3</sup> Contenedor de 20 m <sup>3</sup>
metal	Contenedor de 90 l Contenedor de 5 m <sup>3</sup> Contenedor de 20 m <sup>3</sup>
rechazo	Contenedor de 90 l Contenedor de 3 m <sup>3</sup> Contenedor de 5 m <sup>3</sup> Contenedor de 8 m <sup>3</sup>
asfalto	Contenedor de 5 m <sup>3</sup> Contenedor de 8 m <sup>3</sup>
hormigón	Contenedor de 5 m <sup>3</sup> Contenedor de 8 m <sup>3</sup>
Recogida no selectiva	
Fracción RCD	Contenedores
Mixto	Contenedor de 3 m <sup>3</sup>
	Contenedor de 5 m <sup>3</sup>
	Contenedor de 8 m <sup>3</sup>

### 6.2.3. Condiciones referidas al transporte de los RCD

La herramienta se diseñaría para permitir combinar volumen de transporte y fracción transportada. En este sentido, se requirió que incluyera la mayor cantidad posible de combinaciones para cada tramo de transporte. El usuario debía introducir además el valor de la distancia recorrida.

Como en el caso de la recogida, la herramienta debía de permitir elegir el esquema de transporte que se adecúe al empleado en la región objeto de estudio. Debía de considerar el transporte de RCD “Total” o detallado para cada una de las fracciones consideradas en el apartado 6.2.1.

La Tabla 6.3 indica las asociaciones posibles de Volumen de carga y Fracción RCD que se requirieron considerar en la herramienta para cada tramo de transporte.

**Tabla 6.3** Relación Volumen de carga- Fracción RCD en Transporte

Transporte I	
Tipo de Recogida: selectiva Tramo: Obra civil a Reproceso o Vertido	
Fracción de RCD	Volumen de Carga
inerte	Camión elevador 3 m <sup>3</sup> Camión elevador 5 m <sup>3</sup> Camión elevador 8 m <sup>3</sup> Camión volquete 7 m <sup>3</sup> Camión volquete 15 m <sup>3</sup> Camión volquete 25 m <sup>3</sup>
yeso	Camión elevador 3 m <sup>3</sup> Camión elevador 5 m <sup>3</sup> Camión elevador 8 m <sup>3</sup>
vidrio	Camión elevador 3 m <sup>3</sup> Camión elevador 5 m <sup>3</sup>
plástico	Camión elevador 5 m <sup>3</sup> Camión remolque 20 m <sup>3</sup>
papel	Camión elevador 5 m <sup>3</sup> Camión remolque 20 m <sup>3</sup>
madera	Camión elevador 5 m <sup>3</sup> Camión remolque 20 m <sup>3</sup>
metal	Camión elevador 5 m <sup>3</sup> Camión remolque 20 m <sup>3</sup>
rechazo	Camión elevador 3 m <sup>3</sup> Camión elevador 5 m <sup>3</sup> Camión elevador 8 m <sup>3</sup> Camión volquete 7 m <sup>3</sup> Camión volquete 15 m <sup>3</sup> Camión volquete 25 m <sup>3</sup>
hormigón	Camión elevador 5 m <sup>3</sup> Camión elevador 8 m <sup>3</sup> Camión volquete 7 m <sup>3</sup> Camión volquete 15 m <sup>3</sup> Camión volquete 25 m <sup>3</sup>
asfalto	Camión elevador 5 m <sup>3</sup> Camión elevador 8 m <sup>3</sup> Camión volquete 7 m <sup>3</sup> Camión volquete 15 m <sup>3</sup> Camión volquete 25 m <sup>3</sup>

Tabla 6.3 (Continuación)

Tipo de Recogida: no selectiva Tramo: Obra civil a Clasificación	
Fracción RCD	Volumen de Carga
total	Camión elevador 3 m <sup>3</sup>
	Camión elevador 5 m <sup>3</sup>
	Camión elevador 8 m <sup>3</sup>
	Camión volquete 7 m <sup>3</sup>
	Camión volquete 15 m <sup>3</sup>
Camión volquete 25 m <sup>3</sup>	
Transporte II	
Tipo de Recogida: no- selectiva Tramo: Clasificación a Reproceso ó Vertido	
Fracción de RCD	Volumen de Carga
yeso	Camión elevador 5 m <sup>3</sup>
	Camión elevador 8 m <sup>3</sup>
	Camión volquete 7 m <sup>3</sup>
	Camión volquete 15 m <sup>3</sup>
vidrio	Camión elevador 5 m <sup>3</sup>
plástico	Camión remolque 20 m <sup>3</sup>
papel	Camión remolque 20 m <sup>3</sup>
madera	Camión remolque 20 m <sup>3</sup>
metal	Camión elevador 5 m <sup>3</sup>
	Camión remolque 20 m <sup>3</sup>
rechazo	Camión volquete 7 m <sup>3</sup>
	Camión volquete 15 m <sup>3</sup>
	Camión volquete 25 m <sup>3</sup>
Transporte III	
Tipo de Recogida: no- selectiva ó selectiva Tramo: Reproceso a Vertido	
Fracción de RCD	Volumen de Carga
vidrio	Camión elevador 5 m <sup>3</sup>
plástico	Camión elevador 5 m <sup>3</sup>
	Camión remolque 20 m <sup>3</sup>
papel	Camión elevador 5 m <sup>3</sup>
	Camión remolque 20 m <sup>3</sup>
madera	Camión elevador 5 m <sup>3</sup>
	Camión remolque 20 m <sup>3</sup>
metal	Camión elevador 5 m <sup>3</sup>
	Camión remolque 20 m <sup>3</sup>

#### 6.2.4. Condiciones relativas a instalaciones de gestión incluidas

Las instalaciones de gestión que requirieron ser incluidas en la herramienta se seleccionaron teniendo en cuenta la gestión para la clasificación del RCD “Total” y la gestión de cada fracción en forma individual en instalaciones específicas. Por otra parte, se incluyeron instalaciones de disposición final. Las instalaciones de gestión de RCD a ser incorporadas se muestran en la Tabla 6.4.

En el caso de las plantas de clasificación, tal como se ha expresado en el Capítulo 4, la mayoría de ellas reprocesan el RCD inerte en el mismo sitio. Para poder desglosar el ICV de las mismas se debe conocer la asignación de cargas a cada sector (Clasificación y reproceso de inertes). Se requirió entonces, que la herramienta contara con la etapa “Clasificación”, pudiendo en este caso el usuario decidir si ingresa datos de inventario de PCRI o solamente PC. Es necesario que el usuario esté atento a adecuar el indicador de reproceso de la PIM, considerando en el primer caso que el reproceso del inerte está incluido y en el segundo no lo está.

**Tabla 6.4** Instalaciones de gestión incluidas en ACV-RCD

Instalación de gestión	Nomenclatura
Planta de clasificación de RCD Total	PC
Planta de clasificación de RCD Total y reproceso de inertes	PCRI
Planta de trituración de madera	PTM
Planta de reproceso de IM	PIM
Planta de reproceso de IH	PIH
Planta de reproceso CA	PCA
Planta de reproceso de PC	RPC
Planta de reproceso de PL	RPL
Planta de reproceso de VD	RVD
Planta de reproceso de MT	RMT
Vertedero de Inertes	RA ó VT

### 6.2.5. Condiciones relativas a sistemas de gestión de RCD

ACV-RCD debía permitir diferenciar dos sistemas predeterminados de gestión según el escenario seleccionado (un escenario es una de las combinaciones posibles de las etapas del SIGRCD) según se correspondiera con recogida selectiva o no-selectiva. Las Figura 6.2 y Figura 6.3 indican los escenarios preestablecidos y las etapas incluidas en cada uno. Se requirió que otros escenarios pudieran ser creados por el usuario modificando estos esquemas preexistentes de acuerdo a las condiciones de la gestión de RCD en la región o los objetivos de la evaluación. Por ejemplo, variando el destino y tratamiento que pueden tener las distintas fracciones de RCD u omitiendo la etapa de reproceso para una o varias fracciones.



**Figura 6.2** Escenario de Recogida Selectiva

*Fuente: Elaboración propia*



**Figura 6.3** Escenario de Recogida No-Selectiva

*Fuente: Elaboración propia*

La complejidad del escenario a evaluar dependerá de las etapas incluidas o excluidas en el mismo. Así, por ejemplo, estableciendo diferentes cantidades generadas de cada fracción y distintas eficiencias en la clasificación y en el reproceso del RCD, así como también variando las distancias a las instalaciones de gestión, ha de ser posible evaluar un sinnúmero de escenarios de gestión de residuos.

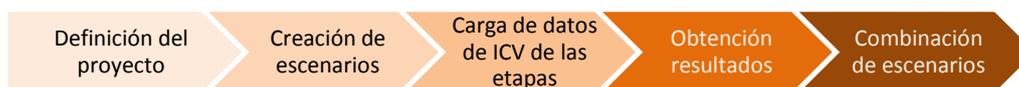
Por otra parte, la herramienta debía permitir la combinación de escenarios, ya sean del mismo o de distintos proyectos. De esta forma se pueden resolver casos en los que puede ser necesario considerar distintas composiciones de RCD vinculadas al origen del mismo en una misma ciudad o región, por ejemplo RCD de construcción nueva o de demolición. A los fines de realizar la combinación es necesario conocer los porcentajes de generación (composición) de cada actividad.

Otro caso de utilidad de esta opción es considerar las diferencias en la gestión interna de RCD si se trata de obras de construcción nueva, reparación o demolición. En el primer caso se pueden utilizar contenedores individuales para almacenamiento o recoger todo mezclado, pero en el segundo y tercer caso es muy frecuente que directamente se acopien y carguen los RCD en camiones, obviando el contenedor. Al igual que en el caso anterior, esta situación es posible de tener en cuenta siempre que se conozca el porcentaje de generación RCD que corresponde a cada actividad.

#### 6.2.6. Condiciones referidas a la mecánica operativa de la herramienta

La herramienta diseñada debía permitir la evaluación ambiental de cada escenario de gestión de RCD planteado, y además individualmente de cada etapa en un mismo escenario, de acuerdo a los módulos del diagrama mostrado en la Figura 6.4.

El usuario comienza por la definición del proyecto y sus características. Luego selecciona el tipo de escenario predeterminado (con recogida selectiva y no-selectiva). Seguidamente introduce datos de inventario propios o genéricos. El paso posterior es el cálculo de indicadores ambientales y finalmente la obtención de resultados. La herramienta debía posibilitar luego la combinación de dos escenarios de gestión.



**Figura 6.4** Mecánica operativa de la herramienta

Para cada módulo se requirió de un procedimiento sencillo, con el fin de facilitar a los usuarios su visualización. La introducción de los datos de entrada necesarios se debía de realizar por medio de cuadros de ingreso, que luego se resumirán en una tabla a la vista del usuario. El usuario dispondría de una guía de instrucciones que explique todo el proceso operativo de la herramienta.

##### *Definición del proyecto:*

En este módulo el usuario debe poder cargar características de su proyecto. La herramienta debía ofrecer elegir entre un proyecto de evaluación ambiental de la gestión de los RCD generados en una obra civil particular o de la gestión de los RCD generados en una región dada para un periodo de tiempo definido.

Por otra parte, son fundamentales en este módulo los datos de composición de los RCD. Se requirió la posibilidad de cargar datos por defecto y que se permita el ingreso de datos propios de composición.

Se estableció la condición de que se pudiera calcular la cantidad total de residuos del proyecto. Si bien esto no influirá en los resultados que se obtienen para 1 t de RCD, da una idea de la magnitud del sistema.

La herramienta debía permitir además, modificar un proyecto creado y guardarlo con otro nombre.

##### *Creación de escenarios:*

La herramienta debía permitir al usuario que acceda a crear escenarios para un proyecto ya definido, pudiendo generar dos tipos básicos (según sea la recogida en obra civil selectiva o no-selectiva) y sus alternativas para el mismo proyecto. Se requirió poder modificar las características de escenarios ya creados.

*Datos de inventario de ciclo de vida de cada etapa del sistema de gestión:*

La herramienta debía permitir incluir las etapas deseadas en cada escenario generado. A su vez en cada una se debía poder cargar los datos de inventario, propios o por defecto.

Los datos de inventario de entradas y salidas de cada etapa se han identificado en la metodología expuesta en el capítulo 4 de esta tesis. Los datos de entrada se debían de poder ingresar mediante cuadros de ingreso, en tanto los de salida (emisiones) se introducirían resumidos en indicadores ambientales de categoría de impacto.

Los datos de entrada se listan a continuación para cada etapa:

- Recogida: selección de combinaciones contenedor- fracción residual.
- Transporte: selección de la combinación volumen de carga-fracción residual e introducción de la distancia del tramo que corresponda.
- Clasificación: introducción de los valores de los consumos eléctricos y de combustible de la instalación de tratamiento.
- Reproceso: selección de la combinación contenedor- fracción residual e introducción de la eficiencia total (clasificación + reproceso) para cada fracción.
- Vertido: introducción de los valores de los consumos eléctricos y de combustible de la instalación de tratamiento.

Los datos de salida se introducirían resumidos en indicadores de categoría de impacto unitarios referidos al dato de entrada o proceso involucrado. A tal fin se deben ofrecer datos por defecto y la posibilidad de modificarlos según datos propios del usuario. En esta opción el usuario debe conocer o tener acceso a cálculos complejos y por lo tanto se debía de incluir como una opción avanzada.

Se requirió que se incluyan los indicadores de categoría de impacto para cada dato de entrada o proceso según se indica en la Tabla 6.5.

**Tabla 6.5** Indicadores de impacto unitarios para cada elemento de entrada

Entrada o proceso	Indicador de categoría de Impacto
Contenedor	Valor Indicador /Contenedor
Combustible Diesel	Valor indicador/ kg diesel
Energía eléctrica baja tensión	Valor indicador/ kWh energía
Reproceso de cada fracción de RCD	Valor indicador/ t de fracción RCD reprocesada

Las categorías de impacto para las que debían ofrecerse indicadores son las listadas en la Tabla 6.6. Su justificación se aportó en el Capítulo 5 de esta tesis. Cabe señalar que la categoría uso del suelo (*LUP*) fue incluida en el capítulo mencionado con un indicador de categoría específico para regiones secas, el indicador de desertificación (*DP*). La herramienta no lo incluye por ser de características particulares y porque su cálculo requiere de operaciones matemáticas diferentes a las utilizadas para el resto de indicadores y por tanto, una programación informática especial.

**Tabla 6.6** Indicadores de categoría de impacto en ACV-RCD

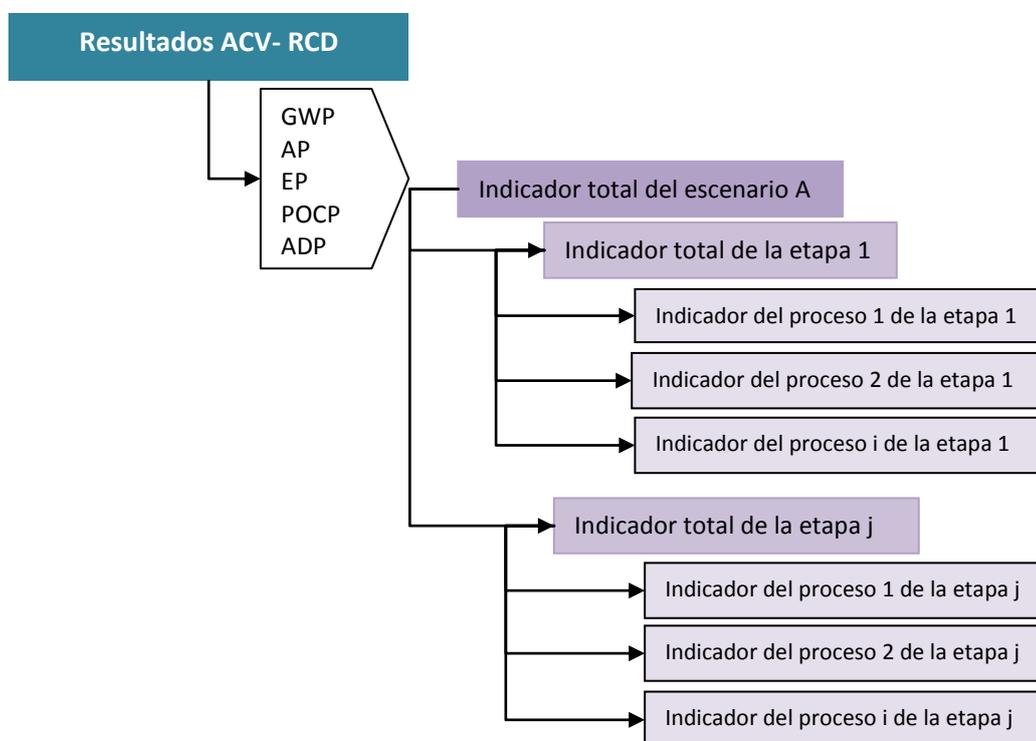
Indicador de categoría	Unidad
Potencial de calentamiento global <i>GWP</i>	kg CO <sub>2</sub> eq.
Potencial de acidificación <i>AP</i>	kg SO <sub>2</sub> eq.
Potencial de eutrofización <i>EP</i>	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq.
Potencial de oxidación fotoquímica <i>POCP</i>	kg de C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq.
Potencial de agotamiento de recursos abióticos <i>ADP</i>	kg Sb eq.

*Resultados:*

Se requirió que la herramienta realice de modo automático la evaluación de impacto del ciclo de vida del escenario creado, en función de los datos cargados previamente, y con el uso de indicadores ambientales.

Todas las operaciones matemáticas realizadas en la obtención de los indicadores ambientales se apoyan en la metodología elaborada en el Capítulo 4 de esta tesis. La metodología a desarrollar debía proporcionar los resultados habituales de los estudios de ACV: categorías de impacto definidas por sus respectivos indicadores.

Se requirió que se puedan transportar a una planilla Excel®, desglosados por etapa del sistema de gestión y además en cada etapa la diferenciación de los valores que constituyen la totalidad de la misma. La Figura 6.5 esquematiza lo dicho y desglosa el indicador en varios indicadores de proceso. En la misma se llama proceso a los componentes que contribuyen al cálculo de cada etapa.



**Figura 6.5** Esquema de resultados de ACV-RCD

*Fuente: Elaboración propia*

### **6.3. Descripción general de la herramienta ACV-RCD**

En el desarrollo de ACV-RCD se han interrelacionado conocimientos técnicos teóricos de bibliografía específica, datos de campo recopilados en empresas constructoras y relativas a la gestión de RCD (transportistas, gestores de plantas de clasificación y tratamiento, plantas de reproceso) y características propias de sistemas de gestión de RCD ya implementados.

El sistema de gestión de RCD se ha modelado a través de relaciones entre las muchas variables que intervienen en los procesos de cada etapa del sistema de gestión. Ofrece diversos puntos de flexibilidad, de tal modo que el usuario lo puede adaptar a su caso particular a través de los escenarios correspondientes.

Una cuestión importante de destacar es que el modelo es aplicable directamente para cualquier localidad o región de la República Argentina, dada la incorporación de datos del mix eléctrico nacional. Para el caso de otros países es necesario el ingreso de sus propios datos de generación eléctrica.

#### **6.3.1. Aplicaciones posibles**

Las aplicaciones de la herramienta ACV-RCD se relacionan directamente con el objetivo que persigue el usuario al hacer uso del mismo. Una de las utilidades es la de evaluar el impacto ambiental de un SGIRCD para una región geográfica definida y en un periodo de tiempo determinado por el usuario. En este caso, la herramienta permite plantear diversos escenarios de gestión a través de la combinación de las distintas etapas del sistema y comparar los perfiles ambientales obtenidos en cada uno; como también detectar los procesos más impactantes dentro de un mismo escenario. Del mismo modo puede utilizarse la herramienta para evaluar etapas individuales e identificar puntos críticos en sus procesos. Cabe señalar además que es una herramienta muy útil tanto en fase de planificación de un SGIRCD como en fase de operación. En este segundo caso permite simular el SGIRCD con condiciones actuales y previstas o futuras.

La segunda aplicación, y no por esto menos relevante, está vinculada a la evaluación ambiental de la gestión de los RCD en obras civiles, en etapa de construcción y demolición. La evaluación ambiental de obras civiles es un sistema complejo que abarca todas las etapas del ciclo de vida de las mismas: construcción, operación, mantenimiento o uso, y fin de vida o demolición. En estos casos el modelo permite evaluar desde el punto de vista ambiental la primera y última etapa en cuanto al manejo de residuos.

#### **6.3.2. Usuarios potenciales**

Los usuarios potenciales de la herramienta son varios y con distintos intereses. Los agentes de la administración pública disponen a través de ACV-RCD de una herramienta de decisión a la hora de implementar el SGIRCD más adecuado a sus requerimientos ambientales. Los funcionarios legislativos encontrarán en ACV-RCD una herramienta que permite predecir el impacto ambiental que aportarían nuevos objetivos a implementar o nuevas normativas en cuanto a la gestión de RCD.

Los profesionales de la construcción, arquitectos e ingenieros, en forma privada o pública, pueden utilizar esta herramienta para evaluar las cargas ambientales de la gestión de RCD durante la etapa de construcción y fin de vida de la obra civil bajo estudio. Los resultados permitirán inferir su participación en el ciclo de vida total de las construcciones.

En otro orden, se incorporan como beneficiarios a los actores del sector científico dedicado a la investigación tecnológica en temas de análisis de ciclo de vida y gestión de residuos.

### 6.3.3. Objetivo de la herramienta ACV-RCD

El objetivo de la herramienta es evaluar y predecir las cargas ambientales de la gestión de 1 t de RCD, ya sea referida a un sistema específico de gestión regional de RCD o a la generación de los RCD de una obra civil en particular.

### 6.3.4. Alcances y limitaciones

La herramienta incluye los siguientes procesos o etapas del sistema de gestión de RCD: Recogida, Transportes, Clasificación, Reproceso y Vertido. Se excluyen en todos los casos las cargas por construcción y desmantelamiento de las instalaciones y equipos para el manejo de residuos, es decir las cargas de infraestructura.

### 6.3.5. Unidad funcional

La unidad funcional de esta herramienta computacional es la gestión de 1 tonelada de residuo de construcción y/o demolición con una composición acorde a lo generado en una región geográfica definida durante un período específico (generalmente un año); o bien a una obra civil en particular durante la etapa de construcción o demolición de la misma.

### 6.3.6. Configuración de los datos de entrada

El modelo requiere datos de caracterización de los RCD del área en cuestión o de la obra civil, según sea el caso de que se evalúe un sistema de gestión de RCD regional o la gestión de residuos de una obra en particular. También se requieren datos de consumos energéticos y de combustibles de cada una de las etapas del manejo de RCD, desde la recogida hasta la disposición final. En algunos casos se debe ingresar además datos de eficiencia, por ejemplo en la etapa de reproceso. Un dato exclusivo de cada sistema modelado es la distancia de transporte.

Los datos necesarios para correr el programa ACV-RCD son sencillos, y se aportan algunos valores por defecto. Sin embargo, cabe destacar que cuantos más datos proporcione el usuario más exactos serán los resultados del mismo.

Se especifican en este apartado la configuración de los datos de entrada de la herramienta ACV-RCD para que las operaciones matemáticas que realiza ofrezcan resultados correctos.

#### *Unidades de los datos en la definición del proyecto*

En la definición del Proyecto se deben introducir dos tipos de datos: datos que permiten calcular la cantidad total de RCD involucradas en el mismo y datos de composición del RCD.

Los primeros se ingresan según el detalle de la Tabla 6.7. El programa calcula la cantidad de residuos generados según el proyecto elegido.

**Tabla 6.7** Unidades de los datos en el cálculo de la cantidad de RCD total

Ítem	Unidad
Población	hab.
Generación RCD per cápita	kg/hab./año
Índice de generación RCD construcción	kg/m <sup>2</sup>
Índice de generación RCD demolición	kg/m <sup>2</sup>
Superficie anual construida	m <sup>2</sup> /año
Superficie anual demolida	m <sup>2</sup> /año

Los segundos, los datos relativos a composición deben ingresarse en porcentaje (%).

#### *Unidades de los datos en cada etapa de gestión de un escenario*

Las unidades de los datos a ingresar en cada etapa de gestión se refieren a continuación:

En la etapa de transporte sólo deben ingresarse la distancia en kilómetros (km).

En la etapa de clasificación, se ingresan datos de consumo de combustible en litros por tonelada de RCD (l/t) y/o consumos de energía en kilowatts-hora por tonelada de RCD (kWh/t).

En la etapa de reproceso se debe ingresar la eficiencia en porcentajes (%).

En la etapa de disposición final se ingresan datos de consumo de combustible en litros por tonelada de RCD (l/t) y/o consumos de energía en kilowatts-hora por tonelada de RCD (kWh/t).

### **6.3.7. Configuración de los datos de salida**

A continuación se describen los datos de inventario de salida de cada etapa incluidos en ACV-RCD. En todos los casos se han utilizado los datos de inventario de emisiones de la base de datos Ecoinvent (SCLCI, 2008).

#### *Etapa de Recogida en obra*

Se contabilizan a través de las cargas ambientales originadas por los distintos contenedores. Para el caso de los contenedores de plástico se han incluido las que corresponden a la obtención de polietileno de alta densidad (HDPE) y a la energía consumida durante el proceso de inyección del HDPE. Del mismo modo para los contenedores metálicos se han contabilizado las cargas ambientales por la obtención de acero reforzado ST 37 y operaciones de manufactura.

#### *Etapa de transporte*

Las cargas ambientales en esta etapa se deben exclusivamente a la producción y consumo de combustible (diesel). Asimismo este consumo dependerá de la cantidad de carga transportada (en toneladas), y esta última de la fracción residual de que se trate.

#### *Etapa clasificación*

En la etapa de clasificación se deben cargar los datos de energía eléctrica y combustible que consumen las plantas destinadas a la separación de las distintas fracciones. Se ingresa un promedio de energía y combustibles para 1 tn de RCD, ya que no puede asignarse un consumo particular de combustible a los materiales individuales.

Los datos pueden obtenerse de consultas en plantas similares o de bibliografía, siendo el tipo de tecnología lo que influirá de manera muy importante en los datos.

A los fines de obtener las salidas de la etapa clasificación, se ha utilizado el inventario de emisiones de la base de datos Ecoinvent (SCLCI, 2008) tanto para el diesel como para el mix eléctrico según se indica en el apartado 6.3.8 de este capítulo.

#### *Etapa de reproceso*

Solo cabe mencionar que esta etapa el cálculo de las emisiones de las cargas evitadas se ha realizado para cada fracción según la metodología explicada en el Capítulo 4.

#### *Etapa de vertido*

A los fines de obtener las salidas de la etapa Vertido, se ha obtenido el inventario de emisiones tanto para el diesel como para el mix eléctrico, según se indica en el apartado 6.3.8 de este capítulo.

### 6.3.8. Datos por defecto

La herramienta cuenta con datos por defecto que el usuario puede cambiar sencillamente en los cuadros de datos. Estos se refieren a composición de RCD, eficiencias de clasificación y reproceso, y los indicadores ambientales de las categorías de impacto incluidas.

#### 6.3.8.1. Composición de RCD

ACV- RCD cuenta con datos de composición por defecto. Los porcentajes de cada fracción corresponden a la composición de RCD en España (MARM, 2008) y se indican en la Tabla 6.8

**Tabla 6.8** Datos de composición por defecto en ACV-RCD

Fracción RCD	Porcentaje
Inerte IM	75
Vidrio VD	0,5
Madera MD	4
Metales MT	2,5
Cartón-papel CP	0,3
Plásticos PL	1,5
Yeso YS	0,2
Asfalto CA	5
Rechazo Re	11
Total	100
Hormigón IH	--

La última fila se refiere a fracciones puras de hormigón y su inclusión permite evaluar su gestión específica.

Los valores porcentuales pueden ser modificados en el mismo cuadro de datos.

#### 6.3.8.2. Eficiencias de la clasificación y reproceso

La Tabla 6.9 indica valores sugeridos para las fracciones consideradas y que aparecen por defecto en la pantalla. El usuario puede modificarlas en el mismo cuadro de datos. Estos porcentajes se obtuvieron de consultas a empresas que operan plantas de clasificación y valores encontrados en bibliografía (Rigamonti *et al.*, 2009).

**Tabla 6.9** Datos de eficiencia de clasificación y reproceso por defecto

Fracción residual recuperada	Es (%) Eficiencia de clasificación	Ep (%) Eficiencia de reproceso	Er (%) Eficiencia total
Inerte mezclado	90	100	90
Hormigón	100	100	100
Asfalto	100	100	100
Plástico	74	74	55
Madera	86	95	82
Vidrio	90	100	90
Metal	90	90	81
Cartón/papel	96	89	85

En ACV-RCD solo hay una instancia de incluir estos valores, en la etapa de reproceso. Puede agregarse allí el porcentaje conjunto entre ambas operaciones: clasificación y reproceso o sólo reproceso.

### 6.3.8.3. Indicadores ambientales

El ACV-RCD contiene indicadores calculados en su mayoría con datos de la base de datos Ecoinvent (SCLCI, 2008). En el caso del consumo eléctrico, se ha utilizado el mix eléctrico de Argentina (CAMMESA, 2011) cuya composición es la indicada en la Tabla 6.10.

**Tabla 6.10** Participación de fuentes energéticas utilizadas en generación eléctrica

Tipo de Generación		Porcentaje (%)
Hidráulica		33
Nuclear		5
Térmica (Total 62 %)	Gas Natural	44,5
	Gas oil	8
	Carbón	2
	Fuel Oil	7,5

Fuente: Elaboración propia

Los datos de emisiones de energía incluyen las emisiones de la generación y suministro de electricidad. La caracterización de emisiones se ha realizado por el método CML 2001 (CML, 2001). En todos los casos se han omitido las cargas relativas a infraestructura.

En el caso del consumo de combustibles, también se ha utilizado el inventario de emisiones del diesel de la base de datos Ecoinvent (SCLCI, 2008). En este caso se ha utilizado el material “Diesel, low sulphur, at regional storage/RER U”. Este ítem incluye las cargas ambientales por obtención de 1 kg de diesel y el transporte del producto de la refinería hasta la boca de expendio. Adicionalmente se han agregado las emisiones al ambiente por uso del diesel (combustión).

Los indicadores correspondientes al reproceso de las fracciones recuperadas se han calculado según las recomendaciones de la base de datos Ecoinvent (SCLCI, 2008) previa adaptación al mix eléctrico argentino. El cálculo de todos los indicadores se ha realizado con el software SimaPro 7.3 (PRe Consultants, 2011).

En la Tabla 6.11 se muestran los valores de los indicadores para contenedores y la Tabla 6.12 para el diesel y energía eléctrica de baja tensión. La Tabla 6.13 contiene los indicadores correspondientes al reproceso de las distintas fracciones, incluyendo la carga evitada.

**Tabla 6.11** Indicadores ambientales por tipo de contenedor

Indicador	Unidad	Contenedor* 90l	Saco de rafia*	Contenedor* 3 m <sup>3</sup>	Contenedor* 5 m <sup>3</sup>	Contenedor* 8 m <sup>3</sup>	Contenedor* 20 m <sup>3</sup>
ADP	kg Sb eq.	3,72E-01	4,04E-02	6,60E+00	1,38E+01	9,17E+00	2,41E+01
AP	kg SO <sub>2</sub> eq.	8,71E-02	9,23E-03	3,59E+00	8,05E+00	3,44E+00	1,42E+01
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq.	7,45E-03	8,82E-04	5,59E-01	1,22E+00	7,95E-01	1,93E+00
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq.	2,49E+01	2,68E+00	8,54E+02	1,79E+03	1,05E+03	3,17E+03
PCOP	kg de C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq.	7,05E-03	5,75E-04	3,67E-01	7,99E-01	6,22E-01	1,30E+00

\*Valores referidos a un contenedor

**Tabla 6.12** Indicadores ambientales del diesel\* y energía eléctrica\*\*

Indicador	Unidad	Diesel	Energía eléctrica
ADP	kg Sb eq.	2,36E-02	1,16E-03
AP	kg SO <sub>2</sub> eq.	2,02E-02	4,02E-04
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq.	4,57E-03	3,31E-05
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq.	3,71E+00	1,46E-01
PCOP	kg de C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq.	6,10E-04	1,96E-05

\*Valores referidos a 1 kg de diesel

\*\*Valores referidos a 1 kWh

**Tabla 6.13** Indicadores ambientales del reproceso de cada fracción recuperada

Indicador	Unidad	IM-CA*	CP*	MD*	VD*	MT*	PL*	IH*
ADP	kg Sb eq.	-3,58E-03	4,17E+00	-3,46E-02	-5,31E+00	-1,40E+01	-2,36E-02	8,77E-03
AP	kg SO <sub>2</sub> eq.	-1,21E-02	2,34E-01	-3,18E-02	-7,95E+00	-4,98E+00	-5,16E-03	-6,77E-03
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq.	-2,95E-03	3,53E-02	-6,45E-03	-5,86E-01	-4,58E-01	-1,18E+00	-2,54E-03
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq.	-2,43E+00	1,47E+03	1,80E+03	-4,61E+02	-1,45E+03	-1,59E+03	-1,55E+00
PCOP	kg de C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq.	-2,88E-04	5,65E-02	-3,64E-03	-2,65E-01	-9,94E-01	-3,98E-01	-5,07E-05

\*Valores para 1 t de material recuperado

### 6.3.9. Datos de inventario primarios modificables en la base de datos del sistema

La herramienta incluye datos de inventario primarios, que sólo pueden ser modificados ingresando a la base de datos del sistema. Debido a ello, no se consideran los mismos como datos por defecto de fácil reemplazo, y se detallan por separado en lo que sigue. Estos datos se refieren a la etapa de recogida y a la etapa de transporte.

#### 6.3.9.1. Datos de inventario referidos a contenedores

En el caso de Recogida Selectiva se requieren contenedores individuales como los mostrados en las Figura 6.6, Figura 6.7 y Figura 6.8.



**Figura 6.6** Contenedores de pre-recogida en obra

*Fuente: Elaboración propia*



**Figura 6.7** Contenedor de recogida selectiva de residuos inertes

*Fuente: Elaboración propia*



**Figura 6.8** Almacenamiento de RCD en saco de rafia

*Fuente: Elaboración propia*

En el caso de Recogida no-selectiva, los RCD mezclados se almacenan en un único contenedor que es retirado periódicamente (Figura 6.9).



**Figura 6.9** Recogida no-selectiva de RCD

*Fuente: Elaboración propia*

Las características de los contenedores de RCD comúnmente utilizados en la recogida de los RCD se muestran en la Tabla 6.14, indicando las correspondientes características técnicas y el número de usos que se ha establecido para su reemplazo por uno nuevo. Los datos fueron obtenidos a partir de información provista por cuatro empresas fabricantes de contenedores y 3 (tres) empresas de transporte de RCD.

El cálculo de la cantidad de contenedores necesarios (N) para cada tipo de material recogido y por tonelada, se ha realizado con la Ecuación 4.2. Los valores de densidad aparente de cada fracción de RCD se han adoptado de acuerdo a datos proporcionados por empresas de plantas de clasificación de RCD españolas y de bibliografía específica (Henry *et. al.*, 1999; Tchobanoglous *et. al.*, 1994, Bustillo, 2010). La Tabla 6.15 indica los resultados obtenidos.

**Tabla 6.14** Datos de contenedores de RCD y número se usos

Tipo de contenedor	Capacidad $V_c$ (m <sup>3</sup> )	Material-Proceso	Peso (kg)	Número de usos (n)
Plástico <sup>a</sup> 	0,09	Polietileno alta densidad-Inyección	9,00	100
Saco de rafia <sup>b,e</sup> 	1	Fibras de polipropileno-Extrusión	1,12	4
Metálico 1 <sup>c,d,f</sup> 	3	Placa de acero ST 37 Laminado Soldado <sup>g</sup>	300,00	5000
Metálico 2 <sup>c,d,f</sup> 	5		650,00	5000
Metálico 3 <sup>c</sup> 	8		800,00	5000
Metálico 4 <sup>c</sup> 	20		1000,00	5000
Metálico 5 <sup>c</sup> 	30		1200,00	5000

<sup>a</sup>Catálogo Contener (España)

<sup>b</sup>Agromarc, comunicación vía e- mail (Buenos Aires, Argentina)

<sup>c</sup>Grupo Ravi, entrevista personal (Castellón, España)

<sup>d</sup>Lucio Agnic, entrevista personal y vía e-mail (Mendoza, Argentina)

<sup>e</sup>Cubas Llopiz, contacto telefónico (Sevilla, España)

<sup>f</sup>Empresa Palumbo, entrevista personal (Mendoza, Argentina)

<sup>g</sup>Jimeca S. L., contacto telefónico (Sevilla, España)

**Tabla 6.15** Cálculo de la cantidad de contenedores para cada fracción de RCD

Fracción de RCD	Densidad aparente (t/m <sup>3</sup> )	Cantidad de contenedores N (Nº de cont./t)					
		Cont. Plástico	Saco de Rafia	Contenedor Metálico 1	Contenedor Metálico 2	Contenedor Metálico 3	Contenedor Metálico 4
Cartón/papel	0,070	1,587	-----	-----	5,714 E-04	-----	1,429 E-04
madera	0,200	0,556	-----	-----	2,000 E-04	-----	5,000 E-05
metales	0,330	0,337	-----	-----	1,212 E-04	-----	3,030 E-05
plásticos	0,060	1,852	-----	-----	6,667 E-04	-----	1,667 E-04
vidrio	0,400	0,278	-----	1,667 E-04	2,667 E-05	-----	-----
yeso	0,637	0,174	0,392	1,047E-04	6,279 E-05	3,920E-05	-----
inerte mezclado	1,200	-----	0,208	5,556 E-05	3,333 E-05	2,083 E-05	-----
hormigón	1,500	-----	-----	4,444 E-05	2,667 E-05	1,667 E-05	-----
asfalto	1,500	-----	-----	-----	2,670E-05	1,67E-05	-----
total	1,000	-----	0,255	6,667 E-05	4,000 E-05	2,500 E-05	-----
rechazo	0,500	0,222	-----	1,333 E-04	3,809 E-05	2,381 E-05	-----

### 6.3.9.2. Datos de inventario referidos a transporte

Los vehículos de transporte de RCD incluidos en la herramienta son camión elevador, camión volquete o camión remolque. El primero es el tipo de camión que recoge contenedores, cuyo volumen puede variar entre de 3 m<sup>3</sup> a 8 m<sup>3</sup> (Figura 6.10). En tanto el segundo, (Figura 6.11) recoge el residuo en la propia caja fija del vehículo. El tercero se caracteriza porque el contenedor es el remolque del camión (Figura 6.12), y se usa para los contenedores de 20 m<sup>3</sup> y 30 m<sup>3</sup> con materiales residuales livianos, tales como cartón y plásticos. Estas características y datos se obtuvieron de tres empresas gestoras de RCD.



**Figura 6.10** Camión elevador

Los consumos medios de los camiones de transporte por cada kilómetro recorrido, se indican en la Tabla 6.16 en función de la potencia del motor. En la misma se han indicado datos primarios obtenidos de consultas a cuatro empresas transportistas de carga.



**Figura 6.11** Camión volquete



**Figura 6.12** Camión remolque

**Tabla 6.16** Consumo de combustible durante el transporte de RCD, según la carga

Tipo de transporte s/ potencia (HP)	Consumo Diesel (l/100km)
140	20- 25
180	25-30
300	35-40

Los consumos de combustible durante el transporte para distintos volúmenes de carga y cada tipo de fracción residual transportada, se han calculado según la Ecuación 4.7. Los resultados se indican en la Tabla 6.17. Obsérvese que hay topes máximos de carga adoptados de acuerdo a la legislación Argentina.

**Tabla 6.17** Consumo medio de combustible del transporte según la fracción de RCD

Volumen de carga (m <sup>3</sup> )	Densidad (t/m <sup>3</sup> )	Peso (t)	Fracción de RCD	Consumo medio Cm (kg diesel/t.km) <sup>a</sup>
3		3.0	total	0.065
5		5.0		0.039
7-8	1.00	7-8		0.024
15		15		0.016
25		25		0.013
3		1.5	rechazo	0.129
5		2.5		0.077
7- 8	0,5	3,5-4		0.051
15		7.5		0.032
25		12.5		0.026
3		3.6	inerte mezclado	0.054
5		6.0		0.032
7-8	1.2	8.4-9.6		0.024
15		16*		0.015
25		25*		0.013
3		4.5	asfalto- hormigón	0.043
5		7.5		0.026
7-8	1.5	12-10*		0.023
15		16*		0.016
25		25*		0.013
3		1.2	vidrio	0.151
5	0.4	2.0		0.090
3		2	yeso	0.095
5	0.64	3.2		0.061
5		0.4	cartón/papel	0.516
20	0.07	1.4		0.154
5		0.3	plástico	0.602
20	0.06	1.2		0.179
5		1.0	madera	0.181
20	0.2	4.0		0.054
5		1.7	metal	0.109
20	0.33	6.6		0.033

\*Carga máxima permitida según legislación Argentina (DNV, 2012)

<sup>a</sup> 1 l de diesel equivale a 0,86 kg de diesel

#### 6.4. Conclusiones del Capítulo

En este capítulo se presentaron las condiciones y el diseño de la herramienta informática ACV-RCD. Dicha herramienta engloba los conceptos y metodología desarrollados en el Capítulo 4, e incluye como categorías de impacto para la evaluación, las categorías seleccionadas en el Capítulo 5, excepto la categoría de uso del suelo.

ACV-RCD permite realizar la evaluación ambiental de sistemas de gestión de RCD a través de indicadores de categoría de impacto que responden a la fase de evaluación del impacto del ciclo de vida de acuerdo a los elementos obligatorios de la técnica de ciclo de vida.

La herramienta es de sencilla aplicación, pudiendo ser empleada por usuarios con conocimiento básico de ACV, puesto que realiza todas las operaciones matemáticas automáticamente. De este modo sólo con ingresar algunos datos propios de una región u obra civil se obtiene el perfil ambiental de todo el sistema o de cada una de sus etapas por separado.

En el Capítulo 7 se aplicará y validará la herramienta con casos de estudio.

# Capítulo 7. CASOS DE APLICACION DE LA METODOLOGIA DE EVALUACION AMBIENTAL

---

## **Resumen**

En este capítulo se aplica y valida la metodología desarrollada en el Capítulo 4 para evaluar el perfil ambiental de sistemas de gestión de RCD. Se han obtenido datos de inventario primarios que permitieron el análisis de casos en España y Argentina. Los cálculos matemáticos para la obtención de los indicadores ambientales por categoría de impacto se han realizado con la herramienta informática ACV-RCD descrita en el Capítulo 6 de esta tesis.

## **7.1. Evaluación de sistemas de gestión de RCD establecidos en España**

En este estudio de caso se realizó la evaluación ambiental de dos sistemas de gestión de RCD implementados en regiones españolas. Se presenta un inventario de ciclo de vida referido a los procesos y materiales que intervienen en cada sistema de gestión de RCD implementado, diferenciados sobre todo por el tipo de PCRI instaladas. Dicho inventario se ha elaborado a partir de datos primarios predominantemente, obtenidos directamente de empresas involucradas en dicha gestión.

Particularmente se evaluó el perfil ambiental de las PCRI instaladas en cada sistema, utilizando para ello los datos de inventario que se recopilaban en cada una. Estas PCRI se diferencian por su capacidad de producción y por el tipo de RCD tratado (mixto u hormigón) y se designan como Tipo I y Tipo II.

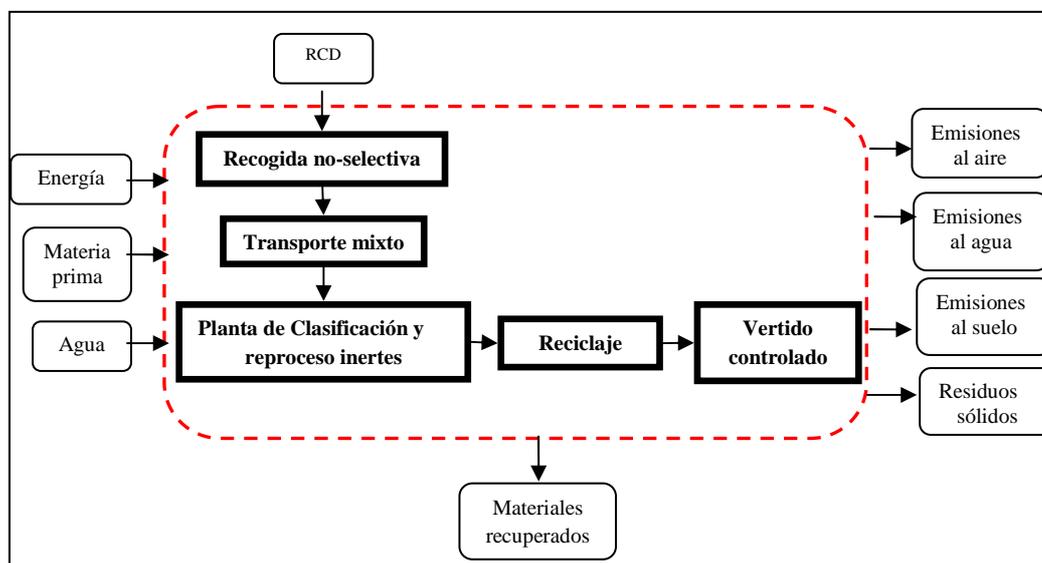
Los indicadores de categoría de impacto utilizados en la evaluación comprenden, ADP, AP, EP, GWP y PCOP. No se ha incluido la categoría de uso del suelo.

### **7.1.1. Descripción de los sistemas evaluados**

El ciclo de vida de los sistemas de gestión de RCD analizados comprende las etapas mostradas en la Figura 7.1. Se referirá a cada sistema con la designación “sistema A y sistema B”, según las plantas instaladas sean Tipo I ó Tipo II. Las etapas se describen a continuación:

*Recogida en obra*

Los RCD generados en la obra de construcción y/o demolición se almacenan en contenedores *in situ*, o se cargan directamente en camiones en caso de demolición. Se almacenan sin hacer ninguna distinción entre los diferentes materiales (RCD mixto) y será segregado más tarde en fracciones.



**Figura 7.1** Límites del sistema de gestión de RCD en España

### Transporte

Los RCD se transportan en contenedores o en camiones, y son llevados a PCRI.

### Clasificación y reproceso de inertes

En esta etapa, los RCD mixtos se llevan a PCRI, donde se separan en las fracciones que pueden ser recicladas y el rechazo. Las plantas de ambos sistemas son de nivel 3, pero tienen diferentes procesos y tecnologías. En este caso de estudio, se clasifican en dos tipos, dependiendo de su capacidad de producción y el tipo de residuos entrante: tipo I y tipo II, que se describen a continuación.

- Tipo I. Estas plantas procesan RCD mixto, pertenecientes a la Categoría 17 de acuerdo con el Catálogo Europeo de Residuos (Decisión 2000/532/CE de la Comisión, 2000). Tienen una capacidad de tratamiento de 500 a 650 t/día y una potencia instalada de 150 a 160 kW. Para las fracciones separadas en planta, tales como cartón-papel, plásticos, madera y metales ferrosos y no ferrosos, estas instalaciones sirven como plantas de transferencia, por lo que almacenan esas fracciones hasta el retiro por las empresas que se encargan del reciclaje. En las PCRI la fracción inerte clasificada se reprocesa y transforma en agregado reciclado, como se explicará en la siguiente etapa de valorización.
- Tipo II. Estas son instalaciones de mayor envergadura con dos líneas de producción. La primera de ellas procesa RCD mixtos, al igual que las de tipo I, pero se diferencia de estas por su capacidad de producción de 3000-4500 t/día. La segunda línea procesa residuos de hormigón por separado y de forma independiente de la mixta. Esta segunda línea, con una capacidad de 2500 t/día, produce agregados secundarios con una mejor calidad y composición más uniforme.

*Valorización*

Este proceso se aplica a las fracciones recuperadas en las PCRI. La fracción inerte, después de haber sido triturada y tamizada, permite producir agregados reciclados de diferente granulometría. Este proceso se lleva a cabo en las PCRI de tipo I con el uso de trituradoras móviles, y en las PCRI tipo II, con instalaciones de trituración fijas. La valorización de las fracciones restantes se lleva a cabo en las instalaciones de reproceso específicas para cada material (cartón-papel, plástico, madera y metales ferrosos y no ferrosos). Como resultado se obtiene material reprocesado, sustituto de materia prima virgen. Otras posibles formas de valorización, como la incineración con recuperación de energía y la recuperación de áreas quedan fuera del alcance de este estudio. La primera por no ser una práctica habitual en España, y la segunda porque no se contó con datos para su evaluación.

*Disposición final*

Esta etapa incluye la disposición final de material de rechazo mediante su transporte a vertedero.

**7.1.2. Objetivos, alcance y unidad funcional**

*Objetivos*

- Elaborar y analizar un inventario del ciclo de vida de la gestión de los RCD en España, considerando datos primarios predominantemente.
- Analizar el perfil ambiental del SGIRCD implementado en el caso de estudio, identificar la o las etapas de mayor impacto y las causas de su influencia.
- Evaluar el perfil ambiental de plantas PCRI.

*Definición de unidad funcional y alcances*

La unidad funcional es la gestión de 1 tonelada de RCD. A la misma se refiere la cuantificación de entradas y salidas en cada etapa de los sistemas de gestión. El estudio comprende todas las etapas de gestión del ciclo de vida del sistema indicado en la Figura 7.1.

Se pone especial énfasis en la información obtenida sobre las PCRI visitadas en España. Los datos provienen de tres instalaciones Tipo I, y dos instalaciones Tipo II, cada una de ellas con menos de 8 años de antigüedad.

Se ha adoptado la composición de los RCD que resulta de los datos de salida de los dos tipos de plantas localizadas en España, y corresponden a un periodo de tiempo de un año de producción. La Tabla 7.1 indica los ítems consultados para la obtención de datos primarios relativos a la composición de RCD.

**Tabla 7.1** Ítems consultados en empresas PCRI españolas para obtener la composición de RCD

<p><b>1. Materiales recuperados:</b> ¿Qué fracciones se obtienen y en qué porcentaje?</p>
<p><b>2. Porcentaje de rechazo o residuos de la planta:</b> ¿Cuál es el porcentaje de rechazo ? ¿Qué residuos se incluyen en esta fracción?</p>

En cada instalación se obtuvo la composición de los RCD ya procesados. Cabe señalar que no todos los datos pudieron ser utilizados por hallarse inconsistencias en el balance de masas entre la entrada de RCD mixtos y la salida de fracciones recuperadas y rechazo. Por este motivo los valores reportados por cada una de las empresas fueron validados antes de ser incluidos en el análisis.

La Tabla 7.2 indica los resultados obtenidos del procesamiento de datos.

**Tabla 7.2** Composición de RCD en PCRI españolas

Fracción residual	Porcentaje (%)	
	Tipo I (sistema A)	Tipo II (sistema B)
inertes	82,000	83,218
plásticos	0,500	0,003
madera	1,500	0,618
metales	0,700	0,044
cartón/papel	0,300	0,023
rechazo	15,000	16,094

*Fuente: Elaboración propia*

El alcance del estudio comprende las cargas ambientales por fabricación y uso de los contenedores de almacenamiento temporal de los RCD, las correspondientes a la generación y consumo de energía eléctrica y combustibles durante el transporte y procesamiento del RCD, y las cargas evitadas debidas a la sustitución de materia prima virgen tras el proceso de valorización (reciclado de ciertas fracciones). Quedan fuera del alcance de este estudio las cargas ambientales debidas a los bienes de capital, tales como infraestructura de las plantas de reproceso, edificaciones, maquinarias y camiones de transporte, como tampoco aquellas relacionadas con el mantenimiento y reparación de la maquinaria utilizada. Asimismo se desprecian las cargas asociadas a impactos ambientales del funcionamiento de oficinas.

### 7.1.3. Análisis de inventario del ciclo de vida

La construcción del inventario del ciclo de vida de un sistema de gestión de RCD requiere dos tipos de datos: los específicos del sistema que se refieren a generación, recogida, transporte, tratamiento de RCD (incluye clasificación y reciclaje) y disposición final; y otros más generales relativos a producción y consumo de energía y combustibles. Estos últimos se señalan a continuación, en tanto los específicos se informan en cada etapa descrita.

En cuanto al mix eléctrico utilizado, la Tabla 7.3 indica los datos utilizados para el caso de estudio.

**Tabla 7.3** Mix eléctrico en España (REE, 2010)

Fuente energética	Porcentaje (%)
Carbón	8.74
Gas oil	3.25
Gas natural	23.27
Hidráulica	12.85
Nuclear	20.95
Fotovoltaica	2.46
Eólica	14.53
Ciclo combinado	13.95

Los indicadores de categoría de impacto incluidos en ACV-RCD, referidos a emisiones por producción y consumo de combustible diesel y energía eléctrica, se actualizaron de acuerdo al mix eléctrico español. Se utilizaron datos de la base Ecoinvent (SCLI, 2008) para las energías primarias y con el programa informático SimaPro7 (Pré Consultants, 2011) se calcularon los indicadores. Se indican en la Tabla 7.4

En los apartados siguientes se describen e indica el origen de los datos de ICV específicos de cada etapa. Para su elaboración se recopilaban datos de empresas gestoras de RCD, realizando consultas sobre los ítems detallados en la planilla- encuesta mostrada en la Tabla 4.15.

**Tabla 7.4** Indicadores ambientales del diesel y energía eléctrica para el caso español

Indicador	Unidad	Diesel*	Energía eléctrica**
ADP	kg Sb eq.	1,83E-03	6,38E-04
AP	kg SO <sub>2</sub> eq.	4,33E-04	4,08E-04
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq.	3,97E-05	2,82E-05
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq.	3,17E-02	8,25E-02
PCOP	kg de C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq.	2,51E-05	1,58E-05

\*Valores referidos a 1 kg de diesel  
 \*\* Valores referidos a 1 kWh

*Recogida*

El almacenamiento de RCD, en las obras de construcción y/o demolición, y el acopio de materiales recuperados en plantas de clasificación, así como su transporte, se lleva a cabo en los contenedores que se muestran en la Tabla 7.5. La selección de los mismos se realizó de acuerdo a los que se constató se utilizan en la región estudiada, a través de la consulta a dos empresas responsables del almacenamiento temporal y transporte de los RCD. Como se analizan dos sistemas de gestión diferentes, con sus respectivas composiciones de RCD, se incluyó en el sistema A el tipo de contenedor “metálico 2” para el 100 % de los RCD; en el sistema B se incluyó el “metálico 2” para un 60 % de los RCD, en tanto el resto se consideró se transporta directamente en camiones sin contenedor.

**Tabla 7.5** Contenedores utilizados en el sistema español

Tipo Contenedor	Volumen (m <sup>3</sup> )	Material-Proceso	Peso (kg)
Metálico 2	5	Acero S275 JR-Laminado. Soldado	650
Metálico 3	8	Acero S275 JR-Laminado. Soldado	800
Metálico 4	20	Acero S275 JR-Laminado. Soldado	1000
Saco de rafia	1	Fibras de PP-Extrusión	1,12

La base de datos por defecto del software ACV-RCD se ha actualizado al caso de estudio. Concretamente, se han sustituido los indicadores ambientales de cada contenedor correspondientes al mix eléctrico de Argentina por el mix eléctrico de España (REE, 2010. Para ello, con datos de la base Ecoinvent (2008), y con ayuda del software SimaPro (PreConsultants, 2011), se han obtenido los indicadores mostrados en la Tabla 7.6.

**Tabla 7.6** Indicadores de categoría de impacto para contenedores del sistema español

Indicador	Unidad	Saco de rafia*	Contenedor* 5 m <sup>3</sup>	Contenedor* 8 m <sup>3</sup>	Contenedor* 20 m <sup>3</sup>
ADP	kg Sb eq.	4,04E-02	1,38E+01	9,17E+00	2,41E+01
AP	kg SO <sub>2</sub> eq.	9,23E-03	8,05E+00	3,44E+00	1,42E+01
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq.	8,82E-04	1,22E+00	7,95E-01	1,93E+00
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq.	2,68E+00	1,79E+03	1,05E+03	3,17E+03
PCOP	kg de C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq.	5,75E-04	7,99E-01	6,22E-01	1,30E+00

\*Valores referidos a un contenedor

Los indicadores de la Tabla 7.6 reemplazaron a los indicadores por defecto de ACV-RCD calculados para el mix eléctrico argentino.

*Transporte*

La etapa de transporte corresponde al traslado del RCD en distintos itinerarios. La selección de las combinaciones “fracción- volumen de carga” se realiza entre las opciones ofrecidas por la herramienta ACV-RCD y teniendo en cuenta la información provista por dos empresas de transporte consultadas. Las distancias de transporte son variables de acuerdo a la localización de las plantas y/o sitios de tratamiento y se indican en la Tabla 7.7 para este caso de aplicación. En el cálculo estas distancias se han contabilizado al doble para tener en cuenta el retorno del medio de transporte.

Los indicadores de categoría de impacto necesarios para el cálculo de las emisiones del transporte son los mostrados en la Tabla 7.4 para el diesel.

**Tabla 7.7** Distancias por itinerario para el caso de estudio español

Itinerario	Designación del tramo	Fracción de RCD	Distancia (km)	
			Sistema A	Sistema B
Obra civil – PCRI ó Obra civil – VT	Transporte I	Total Re IM IH	15	15
PCRI-RPC PCRI-RPL PCRI- PTM PCRI- RMT PCRI- VT	Transporte II	CP PL MD MT Re	130 122 20 76 25	12    1

Cabe señalar que el tramo de Transporte III no fue considerado en la evaluación del sistema por no contar con los datos de distancias necesarios.

*Plantas de clasificación y reproceso de inertes*

En relación a los datos de las PCRI se ha realizado la recopilación en campo, a partir de visitas, consultas y entrevistas con empresas involucradas en su gestión. En todas las plantas se lleva a cabo además el reproceso de la fracción inerte. La Figura 7.2 muestra una imagen de una instalación PCRI, de nivel 3, Tipo II.



**Figura 7.2** PCRI-3, Tipo II  
Fuente: Propia, visita Planta Tipo II, España.

Los datos de inventario se recopilieron de cinco empresas españolas con una capacidad de producción total de 1.446.000 toneladas de RCD al año. Tres de estas empresas son de tipo I (Sistema A) y otras dos son de tipo II (Sistema B). Cabe señalar que cerca de 35 millones de toneladas de residuos se producen cada año en España, con una tasa de crecimiento anual promedio de 8,7% en el período analizado (2001-2005) (MARM, 2008). La producción media de RCD por habitante y año, según datos de 2005, se estima en 790 kg.

De la información obtenida respecto al funcionamiento de las plantas y sus procesos unitarios, se resume en lo que sigue las operaciones involucradas:

- Pre-tratamiento. El proceso se inicia en una báscula de recepción en la cual se registra el peso del camión de transporte y se realiza una primera inspección visual, diferenciando si es RCD predominantemente compuesto de inertes, o se trata de RCD mezclados. La densidad del material define la tarifa para el tratamiento y se acopian en dos sitios diferentes. En el primer caso ingresan al sector primario. En el segundo caso se realiza una limpieza manual una retroexcavadora o retropinza a fin de eliminar materiales de gran tamaño, tales como hierros, plásticos y madera. Los materiales rechazados son acopiados para ser valorizados por otro gestor o destinados a vertido y representan un porcentaje entre 14-20 % en peso del total recibido. La figura 7.3 muestra una de las maquinarias utilizadas.



**Figura 7.3** Sector de pre-tratamiento con retropinza

*Fuente: Propia, visita Planta Tipo I, España*

- Sector primario: línea fija de tratamiento. En este proceso el material ingresa al circuito de clasificación mecánica mediante una pala cargadora a una tolva cuya capacidad varía entre 16- 20 m<sup>3</sup>. En otros casos el camión de transporte descarga directamente en la tolva. Este proceso comienza con una criba (Figura 7.4) cuya abertura varía según las plantas, pero en general el tamaño máximo está entre de 300 mm- 500 mm. El RCD de mayor tamaño se tritura y luego se somete a clasificación en cribas ó tromel. El residuo < 80 mm ingresa a una cinta que lo traslada, previo paso por un electroimán (Figura 7.5), a una criba doble. Allí se obtienen tres fracciones de distinto tamaño:
  - a) 0-20 mm; sale a la venta. En ocasiones se separa en 0-6 mm y 6-20 mm.
  - b) 20-80 mm; sale a la venta previa limpieza por aire de material liviano en túnel de viento.
  - c) 80-500 mm; se somete a un nuevo proceso en el sector secundario.



**Figura 7.4** Criba parrilla en PCRI-3  
*Fuente: Propia, visita Planta Tipo II, España*



**Figura 7.5** Electroimán  
*Fuente: Propia, visita Planta Tipo II, España*

- Sector secundario. En esta operación se agrega un segundo electroimán, una cabina de selección manual de materiales impropios (Figura 7.6 y Figura 7.7) y separación de materiales ligeros.

Existen algunas variantes en cuanto a las operaciones de limpieza del material ligero, que puede realizarse por aire o por agua. En el primer caso se puede plantear un *windshifter*, túnel de viento (*drum separator*) o simplemente un soplado con ventilador centrífugo y jaula de retención de ligeros. En el segundo caso, el material entra en un separador hidráulico que consiste en una cuba de agua de nivel constante, donde el material de menor densidad flota en la superficie y es arrastrado hacia una banda de

cepillos que lo sacan hacia el contenedor de ligeros (Figura 7.8Figura 7.7). El agua utilizada en estos procesos trabaja en circuitos cerrados a fin de minimizar el consumo.



**Figura 7.6** Vista externa de una cabina de separación manual  
 Fuente: *Elaboración propia, planta Tipo II, España*



**Figura 7.7** Vista interna de una cabina de separación manual  
 Fuente: *Página web Planta Tipo II, España.*



**Figura 7.8** Separador hidráulico

*Fuente: Elaboración propia, planta Tipo II, España.*

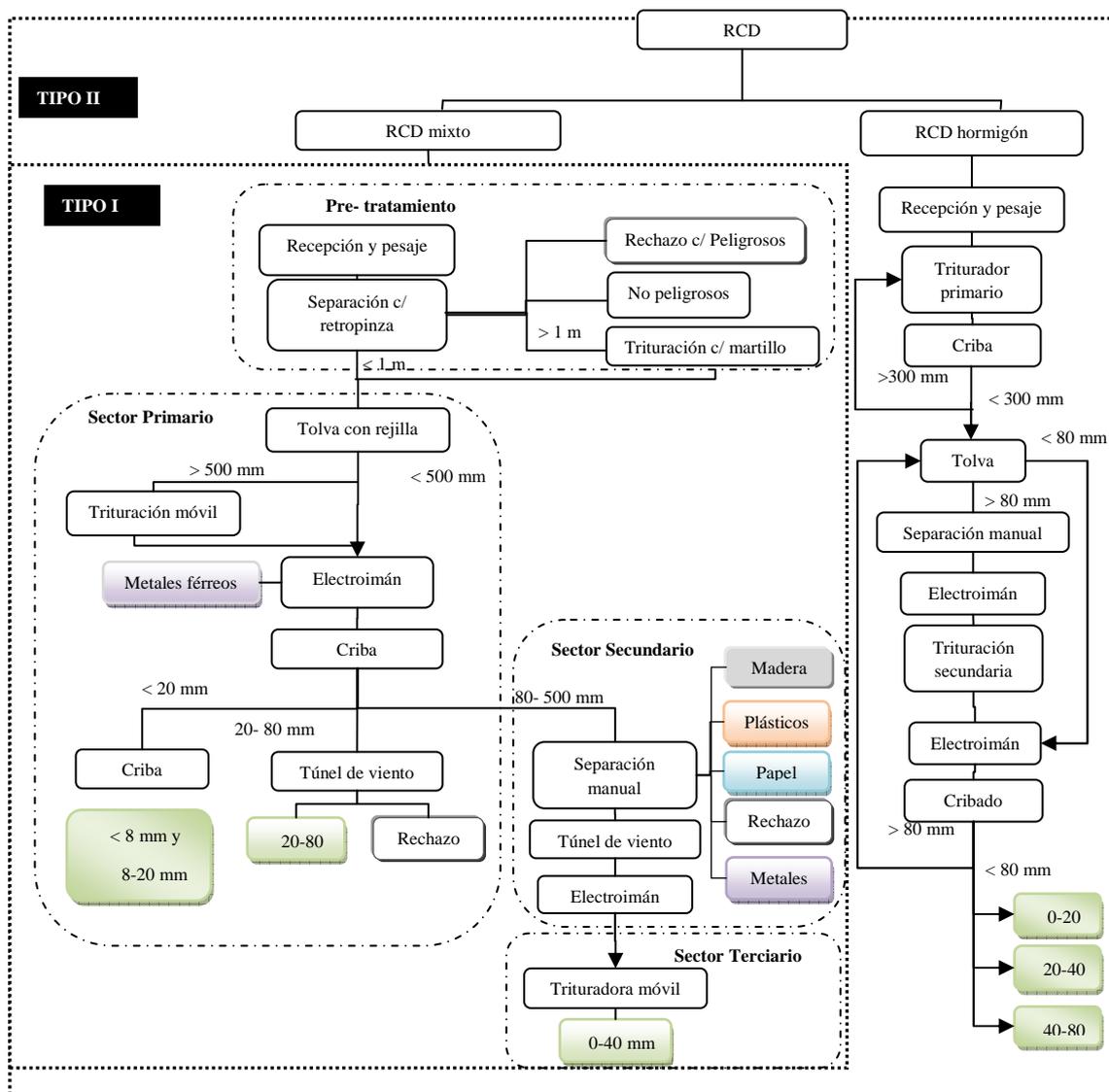
- Sector terciario. El RCD de tamaño 80 mm- 500 mm limpio se tritura en planta fija o móvil obteniéndose agregado secundario de granulometría de 0-40 mm (llamada zahorra artificial en España) o sale a la venta según demanda.

En plantas Tipo II se cuenta además con una línea independiente para residuos de hormigón limpio con un proceso similar que no incluye la limpieza por aire o agua.

- Otras instalaciones. En la mayoría de las PCRI se cuenta con sistemas de supresión de polvo. Los mismos funcionan con sensores que al detectar el camión durante la descarga liberan una cortina de agua o son de accionamiento manual. Adicionalmente poseen aspersores que humedecen el residuo antes de entrar al circuito de limpieza. Por otra parte, cuentan también con filtros de mangas a fin de retener material particulado producido durante las operaciones de cribado y limpieza por aire.

La Figura 7.9 indica los límites del sistema para una planta de tratamiento de nivel 3 que a su vez se han subdividido en Tipo I y Tipo II, según traten RCD mixtos únicamente o además RCD procedente de hormigón.

Las empresas proporcionaron datos anuales sobre las entradas (residuos, agua, electricidad y combustible) y salidas (emisiones al aire y al agua y desechos sólidos) para el período 2008-2009. Estos datos fueron obtenidos de distinto modo: facturas de la empresa prestataria del servicio eléctrico para obtener los consumos energía, consumos mensuales de diesel durante 1 año, consumo del volumen de agua mensual, facturación del RCD tratado, ente otros. Algunas empresas incluso ofrecieron su declaración ambiental anual.



**Figura 7.9** Diagrama de flujo y límites del sistema para plantas de nivel 3, Tipo I y Tipo II.  
Fuente: Elaboración propia

Los datos fueron procesados a fin de relacionarlos con la unidad funcional y, en lo posible con cada sub-proceso mediante la aplicación de los siguientes criterios:

- el consumo de electricidad en función de la potencia instalada en cada sector, asumiendo que las máquinas operan períodos de tiempo similares y el sistema es continuo
- el consumo de combustible en función de la potencia de las máquinas móviles y según el flujo de material tratado (por ejemplo en el caso de trituración de inertes)
- el consumo de agua que se lleva a cabo para mitigar el polvo generado, sobre la base de los datos suministrados por las empresas.

Los datos de inventario de consumos de agua, energía eléctrica y diesel, referidos a la unidad funcional y asignados a los procesos identificados se exponen en la Tabla 7.8.

Ahora bien, los datos de la Tabla 7.8 corresponden a dos procesos: clasificación de los RCD mixtos y reproceso de la fracción inerte. Estos valores se adecúan perfectamente para un análisis detallado de las plantas PCRI, pero a los fines de la evaluación del SGIRCD es conveniente asignar cargas a las dos operaciones por separado y de este modo evaluar el reproceso del inerte y las cargas evitadas.

**Tabla 7.8** Entrada de energía y materiales en la etapa de clasificación y reproceso de inertes

Tipo de Plantas	Proceso	Combustible diesel kg/t	Energía eléctrica kWh/t	Agua l/t
<b>Planta RCD mixtos</b>				
I	Pre- tratamiento	0,05	--	s/d
	Sector primario	0,24	1,44	s/d
	Sector secundario	--	0,62	s/d
	Sector terciario	0,24	--	s/d
	Total	0,53	2,06	1,00
<b>Planta RCD mixtos</b>				
II	Pre- tratamiento	0,04	---	s/d
	Sector primario	0,16	0,14	s/d
	Sector secundario	--	0,06	s/d
	Sector terciario	0,17	0,24	s/d
	Total	0,37	0,44	1,00
<b>Planta RCD hormigón</b>				
		0,88	2,59	1,00

Fuente: Elaboración propia

En función de los datos estimados por las empresas de plantas Tipo I y Tipo II, y datos parciales sobre la distribución de las potencias de cada equipo, se calcularon los porcentajes y valores de consumos asociados a cada operación, que se indican en la Tabla 7.9.

**Tabla 7.9** Asignación de los consumos para plantas Tipo I y Tipo II

Tipo de Plantas	Proceso	Combustible diesel		Energía eléctrica	
		kg/t	%	kWh/t	%
I	<b>Planta RCD mixtos</b>				
	Clasificación	0,05	9,4	2,06	100
	Reproceso de inertes	0,48	90,6	---	---
	Total	0,53	100,0	2,06	100
II	<b>Planta RCD mixtos</b>				
	Clasificación	0,04	0,11	0,20	45,4
	Reproceso de inertes	0,33	0,89	0,24	54,6
	Total	0,37	100	0,44	100
<b>Planta RCD hormigón</b>		0,88	100	2,59	100

Fuente: Elaboración propia

En el caso de la planta Tipo II, para la línea de producción de áridos reciclados de residuos de hormigón, los consumos se asignan en un 100% a reproceso de inertes, puesto que se asume que ingresan residuos de hormigón limpios.

Los indicadores de categoría de impacto necesarios para el cálculo de las emisiones del consumo eléctrico y del diesel son los señalados en las Tabla 7.3 y Tabla 7.4, respectivamente.

#### *Reproceso de fracciones recuperadas*

Los datos de inventario contabilizados en esta etapa consideran las cargas ambientales debidas al reproceso de cada fracción recuperada (inertes, plásticos, madera, metales, y cartón-papel) en la cantidad informada por las empresas de PCRI españolas y la carga evitada debida al ahorro por el reemplazo de materia prima virgen para las mismas. La fracción inerte se reprocesa en la misma planta, mientras las restantes fracciones se almacenan y luego se envían a plantas de reproceso especializadas. La Figura 7.10 ilustra la fracción de metales recuperados en planta de clasificación, y la Figura 7.11 la fracción de plásticos.



**Figura 7.10** Selección de la fracción metales  
Fuente: Propia, visita TEC REC, Madrid



**Figura 7.11** Selección de la fracción plásticos en planta  
Fuente: Propia, visita empresa TEC REC, Madrid.

La Tabla 7.10 expone los datos de inventario utilizados en esta etapa, resume los materiales recuperados considerados y el producto evitado (en el caso del producto evitado se ha referido textualmente el dato secundario de la base Ecoinvent (2008) y su traducción al español. Se incluyen los porcentajes de sustitución según Rigamonti *et al.*, (2009).

**Tabla 7.10** Materiales obtenidos en la PCRI y productos evitados

Material recuperado	Producto evitado	Porcentaje sustitución
cartón- papel	pasta base papel ( <i>sulphate pulp and core board</i> )	1: 0,83
inerte	grava no especificada, en cantera/España ( <i>gravel unspecified, at mine/España</i> )	1:1
metales <sup>a</sup>	arrabio ( <i>pig iron</i> )	1:1
madera	astillas de madera blanda ( <i>wood chips softwood, from industry, u=40%, at plant RER/U:</i> )	1:1
plásticos	Polietileno de alta densidad (0,4 kg), policloruro de vinilo (PVC) (0,20 kg), tereftalato de polietileno (PET) (0,4 kg) ( <i>Polyethylene, HDPE, granulate (0,4kg), Polyvinylchloride (0,20 kg), Polyethylene terephthalate (0,4kg)</i> )	1: 0,81

<sup>a</sup>Se asume el total de la fracción metal como metal ferroso, pues representa el 96% del total.

En general a cada fracción se le atribuye un porcentaje de eficiencia resumidos en la Tabla 6.9. Cabe señalar que en este caso se consideró solamente la eficiencia del reproceso, ya que la eficiencia de la planta de clasificación está implícita en los datos de composición. La Tabla 7.11 indica los valores adoptados para el caso español.

**Tabla 7.11** Valores de eficiencia de reproceso adoptados para el sistema español

Fracción residual recuperada	Er (%) Eficiencia de reproceso
Inerte mezclado	100
Inerte hormigón	100
Plástico	74
Madera	95
Metal	90
Cartón/papel	89

Los indicadores a incluir en ACV-RCD para modelar esta etapa se muestran en la Tabla 7.12 y fueron calculados de acuerdo al mix eléctrico español con SimaPro7 (Pré Consultants, 2011). Todos los valores incluyen la carga evitada.

**Tabla 7.12** Indicadores ambientales del reproceso de cada fracción incluida la carga evitada

Indicador	Unidad	IM ( I)* <sup>a</sup>	IM ( II)* <sup>b</sup>	CP*	MD*	MT*	PL*	IH*
ADP	kg Sb eq.	-7,97E-03	-1,10E-02	4,17E+00	-3,46E-02	-1,40E+01	-2,36E+01	7,16E-03
AP	kg SO <sub>2</sub> eq.	-1,38E-02	-1,43E-02	2,34E-01	-3,18E-02	-4,98E+00	-5,16E+00	-7,81E-03
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq.	-2,45E-03	-2,50E-03	3,53E-02	-6,45E-03	-4,58E-01	-1,18E+00	-1,99E-03
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq.	-2,51E+00	-2,51E+00	1,47E+03	1,80E+03	-1,45E+03	-1,59E+03	-1,59E+00
PCOP	kg de C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq.	-3,58E-04	-3,94E-04	5,65E-02	-3,64E-03	-9,94E-01	-3,98E-01	-8,49E-05

\*Valores para 1 t de material recuperado; <sup>a</sup> Sistema A con planta Tipo I; Sistema B con planta Tipo II

Se indican por separado los indicadores del reproceso de inertes en las PCRI, ya sea plantas Tipo I o Tipo II. Este se debió a que presentaron diferencias en los datos de inventario relativos a consumos eléctricos y de diesel.

#### Vertido

En esta etapa se consideran los impactos debidos a la gestión del vertedero. Los datos corresponden a consumos de combustible por explotación de vertederos de residuos no peligrosos. Estos se obtuvieron de dos empresas que operan vertederos inertes, estos van desde 0,11 hasta 0,28 kg de diesel por tonelada de RCD gestionada. No reportaron consumos de energía eléctrica.

Los indicadores de categoría de impacto necesarios para el cálculo de las emisiones del consumo del diesel son los indicados en la Tabla 7.4.

La composición de esta fracción de rechazo cumple con los criterios establecidos por la Decisión 2003/33/CE del Consejo (CE, 2003).

#### 7.1.4. Evaluación del impacto de ciclo de vida

Los datos de inventario, primarios y secundarios, se han modelado en la herramienta informática ACV-RCD. La Tabla 7.13 señala las etapas en que el ciclo de vida de la gestión de los RCD se divide, los impactos ambientales y las cargas evitadas consideradas en la etapa de reciclaje. Se incluye además una columna que indica las fases involucradas en la herramienta ACV-RCD.

**Tabla 7.13** Etapas, impactos y carga evitada incluidos en el sistema de gestión de RCD

Etapa del sistema de gestión de RCD	Impactos considerados	Carga evitada	Etapa en ACV-RCD
Recogida en obra	Fabricación y uso de contenedores		Recogida
Transporte a clasificación	Consumo de combustibles por transporte de RCD		Transporte I
Planta de clasificación	Consumos de combustible y energía eléctrica		Clasificación
Reciclaje de las fracciones recuperadas	Consumo de combustible por Transporte de RCD a plantas de reproceso. Fabricación y uso de contenedores. Reproceso de cada fracción residual	Producción de materia prima p/ cada fracción	Transporte II Reproceso
Vertido	Transporte a vertedero Fabricación y uso de contenedores Consumo de combustible y energía eléctrica		Transporte III Gestión del vertedero

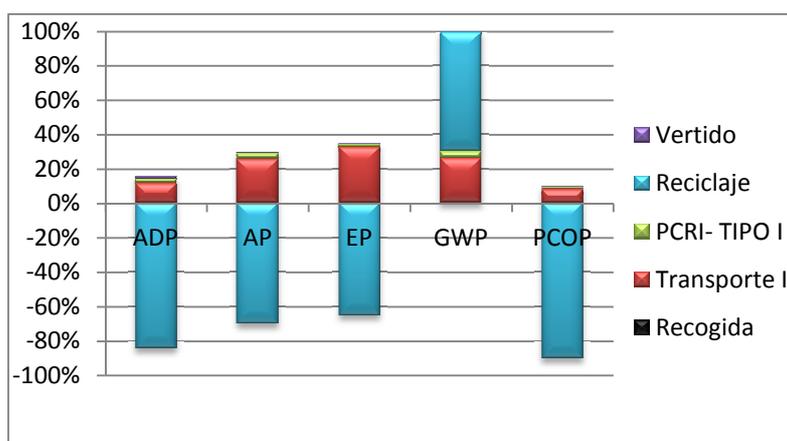
Fuente: Elaboración propia

En los párrafos siguientes se muestran los resultados de la EICV de los sistemas completos evaluados en cada región. Seguidamente se analiza particularmente el perfil ambiental de las PCRI, en los dos tipos analizados.

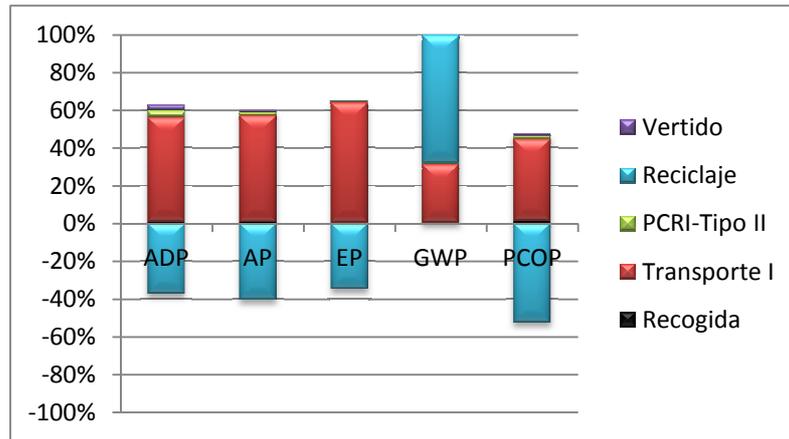
*Evaluación del impacto de ciclo de vida del sistema de gestión español*

Se realizó el cálculo del EICV de los sistemas de gestión de RCD mixtos implementados. Los resultados se muestran en las Figura 7.12 y Figura 7.13. Para estas representaciones se han relativizado al 100% todos los impactos, tanto las contribuciones netas al impacto ambiental como los ahorros debidos a las cargas evitadas. Las barras por debajo del eje horizontal indican los ahorros, en tanto las que están por encima las contribuciones netas. En los dos sistemas se puede observar un perfil ambiental similar. Se destacan los mayores impactos perjudiciales en todas las categorías de impacto aportados por la etapa de Transporte. Asimismo los ahorros o carga evitada por el Reciclaje en todas las categorías excepto el GWP.

La etapa de recogida es casi insignificante en relación a las demás, su porcentaje es de alrededor del 1 % del total del impacto considerado en todas las categorías.



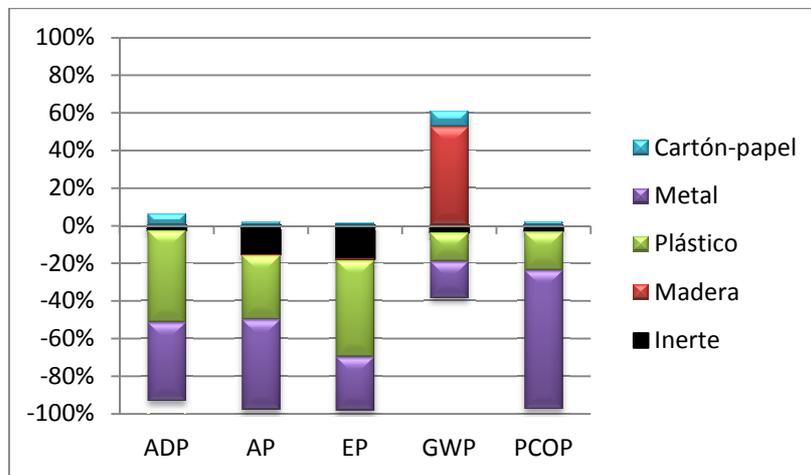
**Figura 7.12** Impactos ambientales del sistema de gestión de RCD, sistema A



**Figura 7.13** Impactos ambientales del sistema de gestión de RCD, sistema B.

Para todas las categorías de impacto, el orden de magnitud de las contribuciones netas, de mayor a menor es: transporte, clasificación, vertido y recogida en ambos sistemas. La excepción es la etapa de reciclaje, que presenta ahorros por las cargas evitadas para cuatro categorías (ADP, AP, EP, y PCOP) y resulta perjudicial en el GWP.

A los fines de analizar esta etapa que comprende el reproceso de varios materiales, la carga evitada por sustitución de materia prima virgen y el tramo de transporte II, se indica en la Figura 7.14 el desglose de las mismas para el sistema A. En la misma puede observarse que las fracciones que contribuyen a los impactos son la madera y el cartón-papel. Asimismo se puede observar que en todas las categorías de impacto los ahorros por las cargas evitadas son mayores a las contribuciones, excepto para la categoría GWP.



**Figura 7.14** Contribución del reciclaje de las distintas fracciones, sistema A

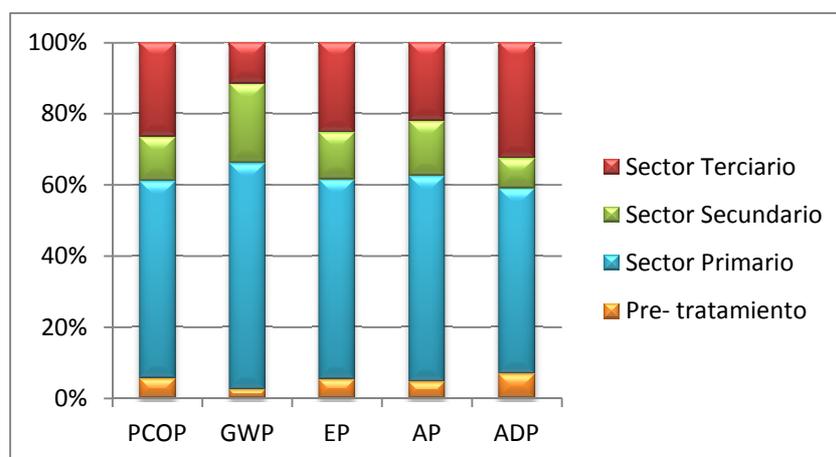
La consideración de los ahorros es altamente significativa en el perfil ambiental del sistema de gestión de los RCD, con indicadores de PCOP, AP, EP y ADP, que superan los impactos en una proporción de 09:01-10:01. Para el indicador GWP, los impactos dominan el perfil ambiental en una proporción de 2/1, pero siempre aparece un ahorro debido al reciclaje.

*Evaluación del impacto de ciclo de vida de las PCRI*

La Figura 7.15 y Figura 7.16 muestran el perfil ambiental de las PCRI, Tipo I y Tipo II, considerando el caso de RCD mixtos. La contribución de cada proceso a cada categoría de impacto se expresa en porcentajes en las Tabla 7.14 y Tabla 7.15.

**Tabla 7.14** Contribución porcentual de procesos al impacto ambiental. Planta Tipo I-RCD Mixto

Categoría de impacto	(%) Pre-tratamiento	(%) Sector Primario	(%) Sector Secundario	(%) Sector Terciario
ADP	6,80	52,15	8,39	32,66
AP	4,61	57,87	15,39	22,13
EP	5,28	56,13	13,26	25,33
GWP	2,43	63,57	22,36	11,65
PCOP	5,55	55,42	12,39	26,63



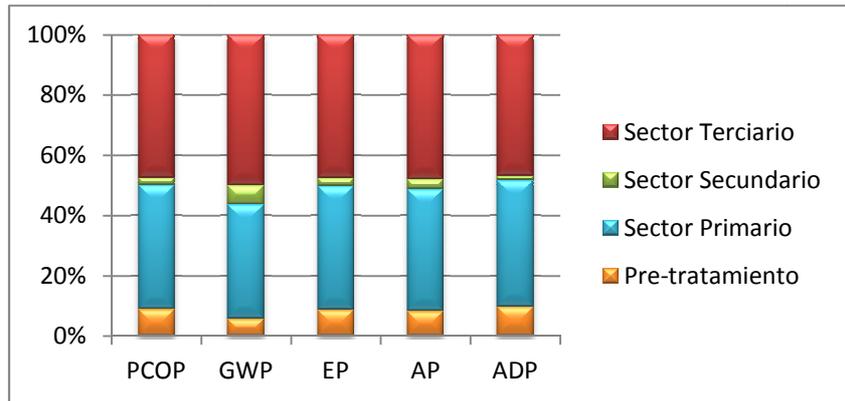
**Figura 7.15** Perfil ambiental de las Plantas Tipo I – RCD mixto

Observando estos resultados se puede apreciar que en Plantas Tipo I, el sector primario es el mayor contribuyente a todas las categorías de impacto con porcentajes que oscilan entre 52- 64%. En orden de magnitud le sigue el sector terciario en casi todas las categorías de impacto, excepto el GWP, con porcentajes que varían entre el 11-33%. Seguidamente, el sector secundario con porcentajes entre el 8-23%. El proceso que menos contribuye es el pre-tratamiento con porcentajes entre el 2-7 %.

**Tabla 7.15** Contribución porcentual de procesos al impacto ambiental. Planta Tipo II-RCD Mixto

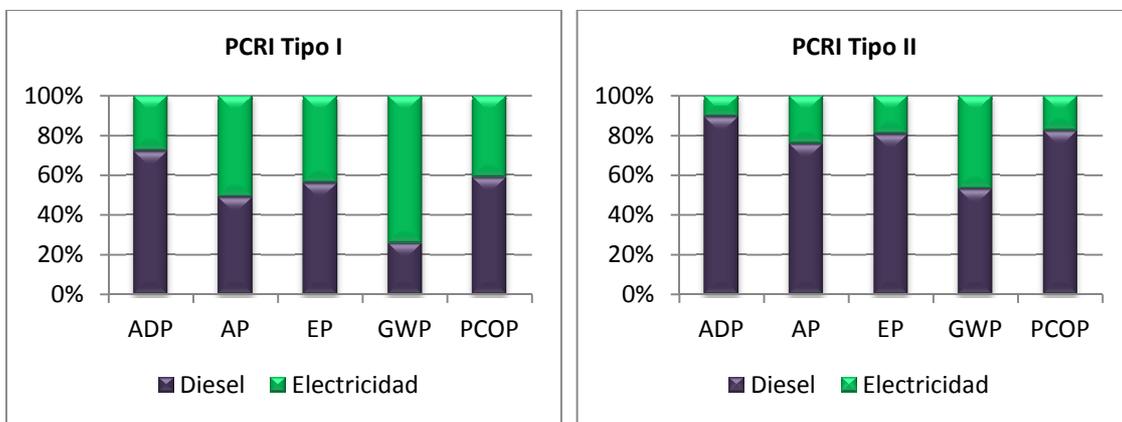
Categoría de impacto	(%) Pre-tratamiento	(%) Sector Primario	(%) Sector Secundario	(%) Sector Terciario
ADP	9,67	42,03	1,44	46,86
AP	8,19	40,47	3,31	48,03
EP	8,71	41,02	2,65	47,62
GWP	5,74	37,88	6,40	49,98
PCOP	8,90	41,23	2,41	47,46

Los resultados de las Plantas Tipo II, permiten observar que el proceso que mayormente contribuye a todas las categorías de impacto es el sector terciario, con porcentajes que varían entre 46-50%. Le sigue el sector primario con porcentajes entre el 37- 42 %. Seguidamente, se ubica el pre-tratamiento con valores entre 5-10% y por último el sector secundario con porcentajes entre 1% - 7%.



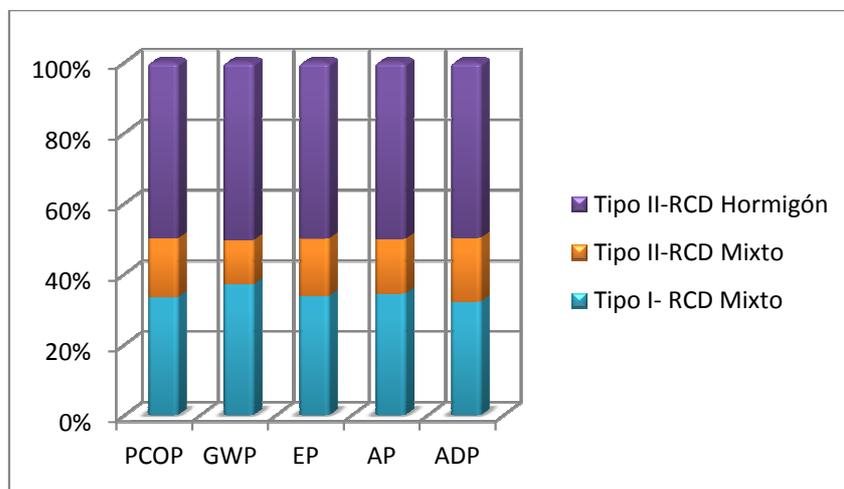
**Figura 7.16** Perfil ambiental de las Plantas Tipo II- RCD mixto

Otras relaciones que se pueden analizar son las contribuciones relativas entre el consumo de diesel y de energía eléctrica. La Figura 7.17 indica una comparativa para las plantas Tipo I y Tipo II, ambas de RCD mixtos.



**Figura 7.17** Contribución al impacto ambiental de los tipos de energía en plantas de RCD mixtos.

La Figura 7.18 grafica los resultados de la planta Tipo I, y la planta Tipo II con ambas líneas de producción: RCD mixtos y RCD sólo hormigón. Claramente puede observarse que las PCRI- Tipo II que procesan solo hormigón tienen un impacto ambiental en todas las categorías superior a las plantas Tipo I y Tipo II que procesan RCD mixtos.



**Figura 7.18** Comparación del perfil ambiental de plantas Tipo I y Tipo II

Asimismo, si se comparan las PCRI Tipo I y Tipo II en líneas de procesamiento de RCD mixtos, las de Tipo II presentan menor impacto en todas las categorías. Los porcentajes comparativos se indican en la Figura 7.17.

**Tabla 7.16** Comparativa porcentual de los impactos ambientales de las PCRI Tipo I y II

Categoría de impacto	(%) Tipo I- RCD Mixto	(%) Tipo II- RCD Mixto	(%) Tipo II- RCD Hormigón
ADP	32,14	18,10	49,76
AP	34,43	15,51	50,07
EP	33,70	16,33	49,97
GWP	37,05	12,53	50,42
PCOP	33,41	16,66	49,93

### 7.1.5. Interpretación de Resultados

Se interpretarán los resultados separadamente según se analicen los sistemas de gestión de RCD o las PCRI particularmente.

#### *Perfil ambiental del ciclo de vida de los sistemas de gestión*

Los perfiles ambientales de los sistemas de gestión de RCD presentados en la Figura 7.12 y Figura 7.13, manifiestan que en todas las categorías de impacto las operaciones de recogida, transporte, clasificación y vertido producen impactos a causa de las emisiones por consumo de combustibles y energía. Particularmente, el impacto provocado por la etapa de recogida tiene una contribución cercana al 1%, por lo cual se recomienda no considerarlo en estudios estimativos de sistemas de gestión de RCD, aunque si pudieran tener importancia en otras opciones para la etapa de recogida.

Las oportunidades de mejora se evidencian para ambos sistemas evaluados en la disminución de las distancias de transporte fundamentalmente, por ser la etapa que más contribuye a los impactos.

En cuanto a las operaciones de reciclaje, éstas generan ahorros por las cargas evitadas en el caso de plásticos, metales y áridos para todas las categorías de impacto. El caso de la madera es desfavorable para las categorías de GWP (con el mayor porcentaje de contribución) y ADP, y presenta ahorros en el resto. El reciclaje de la fracción cartón- papel contribuye al impacto en todas las categorías.

La contribución del reciclaje de madera y cartón, al impacto en el indicador GWP, se explica por el crédito de CO<sub>2</sub> asignado a la producción de madera natural. De hecho, las emisiones de GWP de productos de madera y cartón reciclados son más grandes que los de los correspondientes productos vírgenes, ya que los últimos proporcionan un almacenamiento físico de carbono que antes estaba en la atmósfera como un gas de efecto invernadero (Zabalsa Bribián *et al.*, 2011; Blengini y di Carlo, 2010; Sathre y O' Connor, 2010). Por lo tanto, en el caso de la madera y el cartón-papel es conveniente plantear otras alternativas como pueden ser la incineración con recuperación de energía, y el vertido con captura de metano, entre otras.

Cabe señalar, que el inventario elaborado puede ser base para la planificación de la gestión de RCD en otros sitios, previa adaptación a las condiciones locales de la región de aplicación.

#### *Perfil ambiental de las instalaciones PCRI*

Los resultados de la EICV de las PCRI que procesan RCD mixtos muestran que los mayores impactos ambientales se producen en los sectores primario y terciario para los cinco indicadores seleccionados. El primero podría disminuirse implementando recogida selectiva de RCD en obras de construcción y demolición, ya que involucra varias operaciones de clasificación de residuos ligeros (túnel de viento, electroimán). En cuanto al sector terciario la disminución de los impactos radica en

el uso que se dé al agregado secundario por los tamaños requeridos debido a los consumos por trituración y cribado.

Asimismo, las oportunidades de disminuir el impacto de la clasificación están asociadas a la eliminación de operaciones ejecutadas en el sector secundario, donde se realiza una segunda separación de la fracción liviana que comprende solo el 3% del RCD en peso. Tomando como ejemplo el GWP de las plantas Tipo I, el sector secundario contribuye en un 22 %, este valor podría evitarse implementando como se dijo antes, la recogida selectiva. Por otra parte, es de esperar que la recogida diferenciada en obras aumente el rendimiento de la planta y disminuya el porcentaje de rechazo y operaciones de pre-tratamiento.

Comparando los perfiles de las plantas Tipo I y Tipo II de RCD mixtos, se observa además, que existen diferencias en la contribución de cada sector a los indicadores calculados. Esto puede atribuirse a la fuente de energía utilizada (energía eléctrica y/o diesel) en cada sector.

En cuanto al impacto ambiental producido por cada una de la plantas al tratar 1 t de RCD mixto, se ha podido determinar que las PCRI Tipo I generan más emisiones que las de Tipo II para las cinco categorías de impacto consideradas. Esto es totalmente lógico, si se observan los datos de inventario de ciclo de vida donde los consumos energéticos tanto de diesel como de energía eléctrica por tonelada de RCD tratada son mayores en las PCRI Tipo I.

La Figura 7.18, que compara el impacto ambiental de los tipos I y II para las PCRI de RCD mixto y RCD de hormigón, muestra que las plantas que procesan RCD de hormigón tienen un mayor impacto ambiental que las de RCD mixto, debido a la mayor potencia necesaria para la trituración.

## **7.2. Evaluación del sistema de gestión de RCD en Mendoza, Argentina**

En el Capítulo 3, apartado 3.5, de esta tesis se hizo referencia a la situación actual de la gestión de los RCD en Mendoza, particularmente en el área metropolitana. Asimismo en el Capítulo 5, apartado 5.5.3 se describió la situación particular del Departamento de Las Heras y se evaluó el impacto del uso del suelo por desertificación para el caso de la situación actual de vertido incontrolado en cinco casos concretos.

El propósito de la aplicación de la metodología de evaluación ambiental es, partiendo de la situación inicial de gestión de RCD en Las Heras, evaluar posibles alternativas al sistema e identificar las mejoras.

Se presenta un inventario de ciclo de vida referido a los procesos y materiales que intervienen en el sistema de gestión de RCD en la condición actual y posible. Este inventario se ha elaborado a partir de datos primarios obtenidos de empresas involucradas en dicha gestión siempre que fue factible.

A los fines de este estudio de caso serán consideradas las seis categorías de impacto seleccionadas en el Capítulo 5: disminución del recurso abiótico, acidificación, eutrofización, calentamiento global, formación de foto-oxidantes y uso del suelo.

### **7.2.1. Objetivos, alcance y unidad funcional**

#### *Objetivos*

- Analizar el perfil ambiental del sistema de gestión de RCD actual en el Departamento de Las Heras, Mendoza.

- Elaborar y analizar un inventario del ciclo de vida de la gestión de los RCD aplicable a la zona de estudio, considerando datos primarios predominantemente.
- Analizar el perfil ambiental de alternativas de gestión con incorporación de reciclaje y disposición final controlada.

*Definición de unidad funcional y alcances*

La unidad funcional es la gestión de 1 tonelada de RCD. A la misma se refiere la cuantificación de entradas y salidas en cada etapa del sistema de gestión.

A fin de comparar las cargas ambientales asociadas a la situación actual y posibles alternativas de gestión de RCD, se han considerado tres escenarios:

- Escenario S1: corresponde al vertido incontrolado, situación actual. A los fines del cálculo se han considerado datos obtenidos en el área urbana de la Municipalidad de Las Heras. La distancia media de transporte es de 4000 m según el relevamiento realizado (Mercante *et. al.*, 2009).
- Escenario S2: corresponde a vertido controlado en el único sitio autorizado por el municipio, el vertedero de residuos sólidos urbanos localizado en el Distrito El Borbollón. La distancia media recorrida desde el centro urbano al vertedero es de 10 km.
- Escenario S3: considera la instalación futura de una PCRI en el mismo predio donde se encuentra el vertedero autorizado. Este escenario incluye el reciclaje de las fracciones inertes, hierro y cartón-papel.

Para este caso de estudio se adoptó la composición de RCD que ofrece el programa informático ACV-RCD por defecto. Esta determinación se debe a que no existen en la actualidad datos a nivel regional.

No obstante, por las características de las construcciones en Mendoza con predominancia de materiales inertes, y en base a datos propios (Mercante, 2005) de composición para un caso particular de RCD de viviendas, se puede asumir que la composición adoptada es cercana a la real.

**7.2.2. Análisis de inventario de ciclo de vida**

Los datos de inventario correspondientes a las emisiones en cada etapa del ciclo de vida del sistema de gestión en ACV- RCD (excepto uso del suelo) fueron detallados en el Capítulo 6 de esta tesis.

En los apartados siguientes se describen e indica el origen de los datos de ICV específicos de cada etapa para el caso de estudio.

*Recogida*

Los datos provistos por empresas de alquiler de contenedores y de transporte de RCD de la localidad condujeron a seleccionar los contenedores indicados en la Tabla 7.17.

**Tabla 7.17** Contenedores utilizados en Las Heras, Mendoza.

Tipo de contenedor	Volumen $V_c$ (m <sup>3</sup> )	Material-Proceso	Peso (kg)	Número de usos (n)
Metálico 1 	3	Placa de acero ST 37-Laminado Soldado	300,00	5000
Metálico 2 	5		650,00	5000

*Transporte*

La etapa de transporte corresponde al traslado del RCD, ya sea “total” en los casos de los escenarios S1 y S2, o en distintas fracciones para el escenario S3. La selección de las combinaciones “fracción- volumen de carga” se realizó teniendo en cuenta la información provista por dos empresas de transporte consultadas. Las distancias de transporte son variables de acuerdo a la localización de las plantas y/o sitios de tratamiento y se indican en la Tabla 7.18.

**Tabla 7.18** Distancias por itinerario para el caso de estudio Las Heras

Itinerario	Designación del tramo	Fracción de RCD	Distancia (km)
Obra civil- Vertido incontrolado	Transporte I	Total	4
Obra civil – PCRI ó Obra civil – VT		Re	10
		IM	
	Total		
PCRI-RCP	Transporte II	CP	22
PCRI- PTM		MD	4,2
PCRI- RMT		MT	16
PCRI- VT		Re	1

En el caso de la fracción de plástico, no se ha considerado su reciclaje debido a que no existen plantas de reproceso en la provincia. Asimismo, la fracción metales se asume que se entrega a una planta de transferencia (sitio de compra venta) por lo que la distancia no es real a la planta de reproceso. Las fracciones de madera y cartón-papel se planteó entregarlas a una planta de fabricación de aglomerados de madera y otra de reciclado de cartón- papel, ambas locales.

Cabe señalar que el tramo de Transporte III no fue considerado en la evaluación del sistema por no contar con los datos de distancias necesarios.

*Plantas de clasificación y reproceso de inertes*

En relación a los datos de las PCRI se ha realizado la recopilación en campo, a partir de visitas, consultas vía correo electrónico y entrevistas con empresas involucradas en la gestión de los mismos. Para dar un enfoque regional-local a las tecnologías propuestas, se recopiló información de PCRI de nivel 1 y 2 que se utilizan en Latinoamérica. Se utilizó la planilla- encuesta mostrada en la Tabla 4.15, del Capítulo 4.

En cuanto a los datos de inventario cuantitativos de consumos de combustible y energía eléctrica, no siempre se tuvo éxito, pues, y en el caso de plantas de menor tecnología sobre todo, no se guardan registros de los mismos o en otros casos se dificulta que los comuniquen ante una encuesta.

- Plantas de clasificación y reproceso de inertes de nivel 1 (PCRI-1)

En el caso de las PCRI-1 se referencia una localizada en México D.F. Esta planta solo recibe RCD limpios, esto es, solamente la fracción de inertes, ya sean mixtos o de hormigón. La maquinaria consiste en excavadora (cargadora) que alimenta el equipo de trituración, trituradora C-12 por quijadas (Ver Figura 7.19), cribas S-5 (Figura 7.20), cono de trituración en caso de requerir tamaños menores, y cargadora frontal para el retiro de los materiales reciclados. Todo el equipamiento está montado sobre orugas, lo que permite movilizarlo a distintos sitios del predio. Cuenta con separador magnético de metales.

Las plantas móviles tienen la ventaja de poder ubicarse temporalmente en las obras de construcción o demolición. Se trasladan a través de ruedas de neumáticos (tipo camión) o por un sistema de orugas autopropulsadas. El costo de tratamiento por tonelada de RCD resulta superior a la de una central fija. Los sistemas se pueden montar en menos de un día. Cuentan con equipo de pre-cribado, trituración, separación magnética y cribado final, junto con cintas transportadoras. Pueden procesar hasta 100 t/h, y el tamaño máximo a procesar no debe exceder los 700 mm siendo necesario reducir el tamaño con martillo hidráulico o cizalla. La Figura 7.21 ilustra otra planta de reproceso móvil.



**Figura 7.19** Sistema de trituración por quijadas  
Fuente: Rivera Mera, (2009)



**Figura 7.20** Equipo de cribado móvil.  
Fuente: Rivera Mera, (2009)

Las plantas semi-móviles también se trasladan en camión, pero suelen demorar hasta tres días en ser montadas en un lugar de operación determinado, y son de mayor envergadura que las móviles.



**Figura 7.21** Planta de reproceso móvil, nivel 1  
 Fuente: Propia, visita Planta Tipo II

Durante las consultas se solicitó una información con el formato de la planilla mostrada en la Tabla 4.17, no obstante solo se consiguió información de una de las PCRI-1.

Los datos de inventario de consumos de energía se han obtenido en forma directa y corresponden a una sola planta ubicada en Distrito Federal, México. Ocupa 8 ha para el reprocesamiento de RCD y 8 ha adicionales para “amortiguar” el impacto ambiental, según declaración de la empresa. Se adoptará para el caso de estudio 8 ha de ocupación efectiva. La Tabla 7.19 resume los datos del ICV elaborado.

**Tabla 7.19** Datos de inventario para PCRI-1. Caso México.

Capacidad producción	125m <sup>3</sup> /h	
Densidad media RCD	1.300 kg/m <sup>3</sup>	
Capacidad en peso	162,5 t/h	
Área de la actividad	8 ha	
Maquinarias	Consumo diesel	
	(l/h)	(l/t)
Cargadora	16	0,10
Trituradora C-12	40	0,25
Clasificadora S-5	20	0,12
Cono de trituración	16	0,10
Cargador frontal	22	0,14
Consumo total	114	0,70
Fracción Rechazo	2-3 %	

Fuente: Granell E (2010) Comunicación personal, México

- Plantas de clasificación y reproceso de inertes de nivel 2 (PCRI-2): Caso Brasil

Entre las plantas de nivel 2 cabe mencionar las que han podido localizarse en Brasil. Generalmente la maquinaria utilizada proviene del sector de explotación de áridos con algunas modificaciones. Estas PCRI son simples comparadas con centrales europeas. Generalmente, se componen de alimentador, triturador, cintas transportadoras y electroimán para la separación de metales, y trabajan en vía seca. Su capacidad varía entre 15 t/h y 170 t/h.

Se tuvo la oportunidad de visitar dos PCRI fijas que podrían encuadrarse en el nivel 2, una localizada en la ciudad de Joao Pessoa y otra en Sao Paulo. De ellas se pudo conocer las operaciones unitarias y las líneas de producción, pero no así los valores de consumos, necesarios para el ICV.

La Figura 7.22 muestra una instalación de nivel 2. En esta última imagen puede verse la cabina de separación manual donde se recuperan todas las fracciones que no son inertes.



**Figura 7.22** Planta de nivel 2 con separación manual en la línea de producción.  
*Fuente: Propia, visita planta en, Brasil*

La Figura 7.23 ejemplifica otra PCRI-2, pero a diferencia de la anterior, solo residuo inerte ingresa a la línea de producción. El RCD mixto ha sido clasificado en forma manual antes de ingresar al proceso. En este segundo caso el predio cuenta con un área de almacenamiento donde bajo la forma legal de una cooperativa operarios realizan la limpieza del RCD y recuperan las distintas fracciones.



**Figura 7.23** Planta de nivel 2, sin separación manual en la línea de producción  
*Fuente: Propia, visita Planta Brasil*

En los objetivos de este estudio de caso, se propuso un escenario de gestión que incluye una PCRI. Se adoptó el ICV de la PCRI-1 de México con las adaptaciones locales. Por lo dicho, no se contabiliza la etapa de clasificación mecánica y se asume que se clasifican los RCD manualmente antes de ingresar a la planta. Por esta operación se considera la utilización de una retroexcavadora con un consumo de 0,05 kg/t, según datos de la empresa.

Para el caso de la categoría de impacto de uso del suelo, el inventario de ciclo de vida de la PCRI se presenta en la Tabla 7.20. Los mismos corresponden a las variables involucradas en la Ecuación 5.16. Con esta ecuación el cálculo es independiente del tiempo de la actividad considerado como vida útil de la instalación.

**Tabla 7.20** Datos de inventario para cálculo del indicador DP en PCRI-1

Identificación del sitio	Planta de Reproceso El Borbollón
Tipo ecosistema	Del Monte
Factor de sensibilidad, FS <sub>e</sub>	7
Área actividad (ha)	8
Capacidad de la planta (t/día)	1296
Cobertura vegetal inicial	4
Cobertura vegetal final	6
$V_{CobVeg}$	2
$V_{BceHid}$	1
Índice de aridez	0,047
$V_{Aridez}$	4
LCI	7

*Reproceso de fracciones recuperadas*

Los datos de inventario contabilizados en esta etapa consideran las cargas ambientales debidas al reproceso de cada fracción recuperada (inertes, madera, metales, y cartón-papel) en la cantidad que resulta de la composición adoptada, y la carga evitada debida al ahorro por el reemplazo de materia prima virgen para las mismas. La fracción inerte se reprocesa en la PCRI-1, en tanto las restantes se almacenan y luego se envían a plantas de reproceso especializadas.

En general a cada fracción se le atribuye un porcentaje de eficiencia resumidos en la Tabla 7.21.

**Tabla 7.21** Datos de eficiencia a aplicar por defecto en ACV-RCD

Fracción residual recuperada	Es (%) Eficiencia de clasificación	Ep (%) Eficiencia de reproceso	Er (%) Eficiencia total
Inerte mezclado	90	100	90
Madera	86	95	82
Metal	90	90	81
Cartón/papel	96	89	85

Los datos de inventario utilizados en esta etapa son los incluidos en ACV-RCD, excepto para el caso de la fracción inerte. Para esta fracción se recopilamos datos de ICV regionales para la producción de árido natural, en tanto los consumos por reproceso se adoptaron de la PCRI-1 mexicana. Conceptualmente se utilizaron los productos evitados y entradas indicados en la Tabla 7.22.

**Tabla 7.22** Productos evitados y reproceso de la fracción inerte en Mendoza

Productos evitados	Consumos por reproceso de la fracción inerte
Mineral, obtención y clasificación granulométrica de 1 t de árido natural en cantera, y traslado a depósito, Mendoza	Combustible por trituración y clasificación granulométrica de 1 t de inerte residual (se adoptó el consumo de la PCRI-1 de México)

Se recopilamos datos de ICV en cinco canteras que proveen áridos naturales a la zona metropolitana. Se consideraron los consumos por producción del árido y el transporte hasta depósitos ubicados en la periferia de la ciudad, pues los sitios de explotación están alejados una distancia de entre 10 y 65 km. De este modo se podría comparar equitativamente la carga ambiental entre un árido adquirido en la PCRI-1 y el natural.

De los datos de consumo eléctrico y diesel se realizó un promedio ponderado de acuerdo a la producción diaria. Tabla 7.23 indica los resultados obtenidos. Se adoptó una densidad de 1800 kg/m<sup>3</sup> para el árido natural y de 1300 kg/m<sup>3</sup> para la fracción de inerte (IM). Estos datos se modelaron en SimaPro7 (Pré Consultants, 2011) y se obtuvieron los indicadores regionales a incluir en ACV-RCD.

**Tabla 7.23** Datos de ICV para el reproceso de inertes incluido la carga evitada en Mendoza

Actividad		Consumo diesel (kg/t RCD)	Consumo eléctrico (kwh/t RCD)
Obtención árido natural	Explotación	0,272	0,34
	Transporte a depósito	0,425	---
	Total	0,70	0,34
Reproceso inertes	Total	0,60	---

La categoría uso del suelo no se evalúa en la operación de reproceso por no contar con los datos necesarios.

### Vertido

En esta etapa se consideraron los impactos debidos a la gestión del vertedero. Para ello se adoptó el valor de 0,15 kg de diesel por tonelada de RCD gestionada. Este dato fue aportado por una empresa local que gestiona RCD. Se utilizó ACV-RCD para el cálculo de indicadores.

En el caso de la categoría uso del suelo los datos de inventario se indican en la Tabla 7.24. Se necesita en principio, conocer los datos de superficie y volumen de la actividad a los fines de aplicar la Ecuación 5.18 al vertido controlado. Para estos fines se realizó una recopilación de información brindada por empresas gestoras en páginas web propias y revistas especializadas. Se adoptó para este trabajo el promedio los valores publicados de tres vertederos controlados, resultando una relación volumen/área de 9 m. La densidad se adopta de 980 kg/m<sup>3</sup> para RCD sin tratar.

**Tabla 7.24** Inventario para el cálculo del indicador DP en vertedero

Identificación del sitio	Vertedero controlado El Borbollón
Tipo ecosistema	Del Monte
Factor de sensibilidad, FS <sub>e</sub>	7
Relación Volumen /Área actividad ( m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	9
Tiempo actividad (años)	30
Cobertura vegetal inicial	4
Cobertura vegetal final	6
$V_{CobVeg}$	2
$V_{BceHid}$	1
Indice de aridez	0,047
$V_{Aridez}$	4
LCI	7

### 7.2.3. Evaluación del impacto del ciclo de vida

En función de los datos de ICV recopilados y adoptados se realizó la EICV para cada escenario planteado en el apartado 7.2.2, objetivos y alcance. En cada caso, se aplica ACV-RCD para el cálculo de indicadores de impacto ambiental en las categorías de calentamiento global, acidificación, eutrofización, formación de foto-oxidantes, y agotamiento del recurso abiótico. Para la categoría uso del suelo se realizó la evaluación con el indicador de desertificación.

*Escenario 1: Situación actual*

Las etapas a considerar en este escenario son las de recogida, transporte y vertido incontrolado. El caso de la disposición final se ha acotado a los vertidos relevados y descriptos en el apartado 5.5.3, del Capítulo 5 de esta tesis.

Para la etapa de recogida se ha considerado que se utilizan contenedores de 5 m<sup>3</sup> en un 40% de los RCD, el resto se transporta sin contenedor.

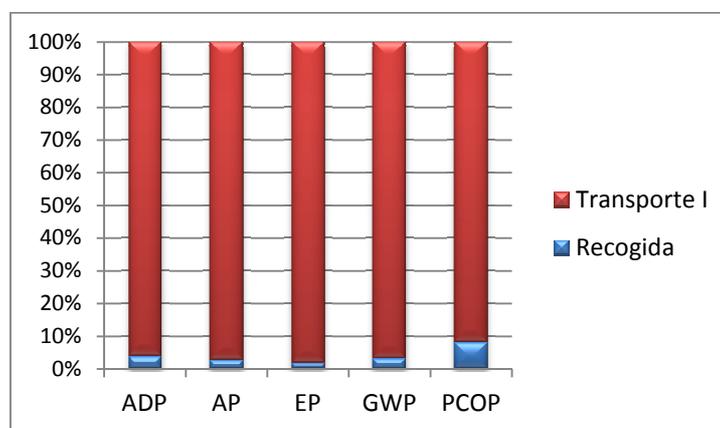
En la etapa de transporte se ha considerado el 40% en camiones de 5 m<sup>3</sup> y el resto en camiones de 7m<sup>3</sup>. La etapa de vertido incontrolado no tiene consumos.

Realizados los cálculos, la herramienta ACV-RCD arrojó los resultados indicados en la Tabla 7.25, y graficados en la Figura 7.24.

**Tabla 7.25** EICV del escenario S1, situación actual en Las Heras para 1 t RCD

Indicador de impacto	Unidad	Etapa		
		Recogida (%)	Transporte I (%)	Vertido incontrolado
ADP	kg Sb eq.	3,73	96,27	---
AP	kg SO <sub>2</sub> eq.	2,59	97,41	---
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq.	1,74	98,26	---
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq.	3,12	96,88	---
PCOP	kg de C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq.	8,03	91,97	---

Los resultados permiten deducir la gran influencia del transporte por sobre la etapa de recogida, situación ya observada en el caso de la evaluación del sistema español. En este caso, la recogida contribuye con porcentajes entre el 1,75 % y 8 %, en tanto el transporte con valores entre el 98,25 % y 92%.



**Figura 7.24** Contribución al impacto ambiental de cada etapa en el escenario S1

Para el indicador de desertificación, los resultados se indican en la Tabla 7.26, la cual es un resumen de la EICV realizada en el Capítulo 5. Este valor depende del sitio evaluado.

**Tabla 7.26** Indicador de desertificación para el Escenario S1, etapa vertido incontrolado

Casos analizados	DP <sub>VT,t</sub> (ha-año)/t RCD
Caso 1	4,82E-03
Caso 2	3,16E-02
Caso 3	7,14E-03
Caso 4	1,29E-02
Caso 5	1,39E-03

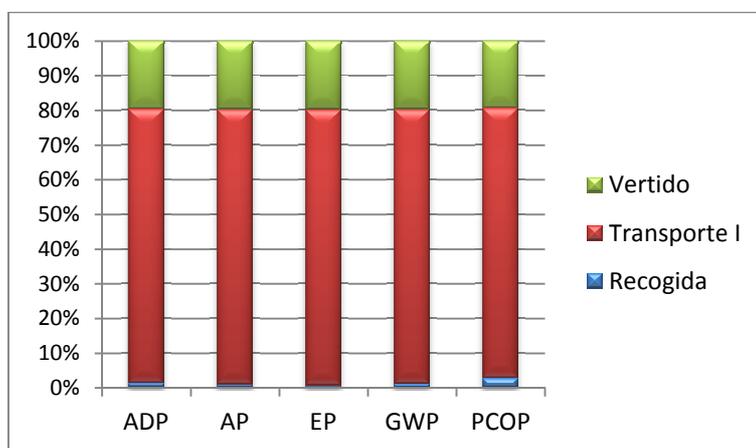
*Escenario 2: Incorporación del vertido controlado al escenario S1*

En este escenario se mantienen las mismas condiciones de recogida y transporte, pero el vertido se asume que se realiza en forma controlada en el vertedero habilitado por el municipio en El Borbollón.

Realizados los cálculos, la herramienta ACV-RCD arrojó los resultados indicados en la Tabla 7.27, y graficados en la Figura 7.25.

**Tabla 7.27** EICV del escenario S2 en Las Heras

Indicador de impacto	Unidad	Etapa		
		Recogida (%)	Transporte I (%)	Vertido (%)
ADP	kg Sb eq.	1,23	79,02	19,75
AP	kg SO <sub>2</sub> eq.	0,84	79,33	19,83
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq.	0,56	79,55	19,89
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq.	1,02	79,18	19,80
PCOP	kg de C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq.	2,72	77,83	19,46



**Figura 7.25** Contribución al impacto ambiental de cada etapa en el escenario S2

Los resultados permiten apreciar una rotunda prevalencia del transporte en la contribución a cada categoría de impacto entre 77,83 % y 79,55 %. Le sigue el vertido controlado con porcentajes entre 19,46% y 19,87%. La etapa de recogida abarca porcentajes mínimos con un rango de entre 0,56% y 2,72 %.

Para el indicador de desertificación, se utiliza la Ecuación 5.18, expresada en ha-año por 1 t de RCD. El resultado es de 3,40E-04 ha-año/t RCD.

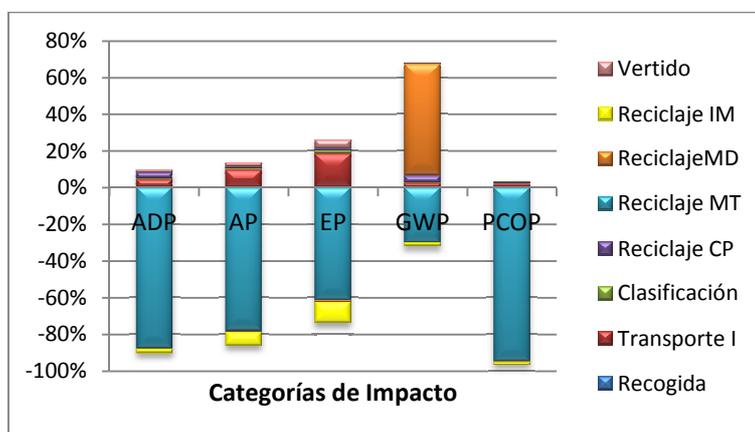
*Escenario 3: Incorporación de una PCRI-1 al escenario S2*

Las etapas a considerar en este escenario son las de recogida, transporte I, clasificación manual, transporte II, reproceso y vertido controlado. La instalación PCRI-1 es supuesta, y tanto esta planta como el vertedero se ubican en el Borbollón.

Ingresados los datos en ACV-RCD y realizados los cálculos, la herramienta permitió obtener los resultados indicados en la Tabla 7.28, y graficados en la Figura 7.26.

**Tabla 7.28** EICV del escenario S3, en Las Heras (para 1 t RCD)

Indicador de impacto	Unidad	Recogida	Transporte I	Clasificación	Reciclaje CP	Reciclaje MT	Reciclaje MD	Reciclaje IM	Vertido
ADP	kg Sb eq.	0,000220	0,014187	0,001017	0,011114	-0,282795	-0,000707	-0,007787	0,003822
AP	kg SO <sub>2</sub> eq.	0,000129	0,012130	0,000869	0,001008	-0,100268	-0,000676	-0,009840	0,003268
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq.	0,000019	0,002744	0,000197	0,000183	-0,009163	-0,000128	-0,001717	0,000739
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq.	0,028669	2,227243	0,159619	3,831202	-29,232472	59,020186	-1,739619	0,600049
PCOP	kg de C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq.	0,000013	0,000366	0,000026	0,000157	-0,020116	-0,000108	-0,000284	0,000099



**Figura 7.26** Contribución al impacto ambiental de cada etapa en el escenario S3

Los resultados muestran para todas las categorías de impacto, con excepción del calentamiento global, el escenario planteado presenta un impacto ambiental beneficioso. En el caso del calentamiento global se detecta una fuerte influencia del reciclado de la madera, provocando un balance total con una contribución a esta categoría.

En el caso de la categoría de impacto de uso del suelo se utiliza la Ecuación 5.16 para el caso de la PCRI, expresada en unidades de ha-año por 1 t de RCD. El resultado es de 1,69119E-05 ha-año/t RCD. Por lo tanto, el impacto por desertificación del escenario uso del suelo es la suma del impacto por funcionamiento de la PCRI-1 y del vertido controlado. Se indica en la Tabla 7.28 el valor final calculado.

**Tabla 7.29** Indicador de desertificación para el Escenario S3

Etapa de gestión	DP (ha-año/t RCD)	Fracción RCD (t)	DP/etapa (ha-año/t RCD)
PCRI-1	1,69E-05	1	1,69E-05
Vertido controlado	3,40E-04	0,182	6,19E-05
Total S3		7,88E-05	

### Comparación del perfil ambiental de los tres escenarios

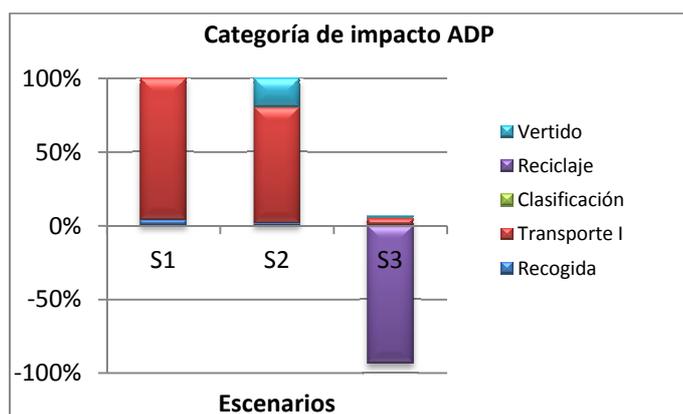
Se han calculado los indicadores de impacto para cada escenario planteado para un sistema de gestión regional. Cada escenario constituye una alternativa de gestión de los RCD, partiendo de la situación inicial, escenario S1. La Tabla 7.30 resume los resultados de los tres escenarios.

**Tabla 7.30** Resultados totales de la EICV para cada escenario

Escenario	Indicador de categoría de impacto				
	ADP (kg Sb eq./t RCD)	AP (kg SO <sub>2</sub> eq./t RCD)	EP (kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq./t RCD)	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq./t RCD.)	PCOP (kg de C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq./tRCD)
S1	0,00589	0,00589	0,00589	0,91957	0,00589
S2	0,01795	0,01529	0,00345	2,81272	0,00047
S3	-0,26093	-0,09338	-0,00713	34,89488	-0,01985

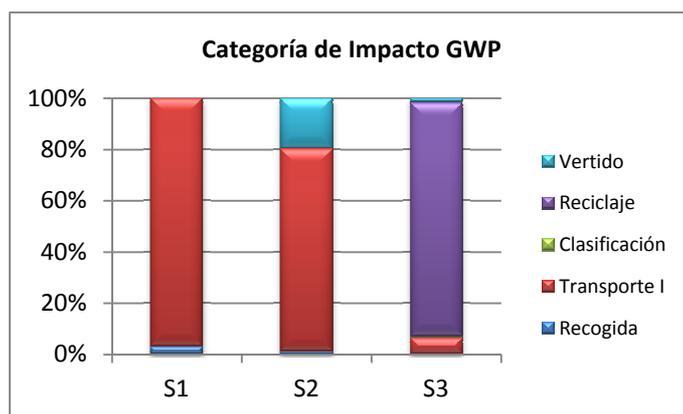
Los valores indican un patrón de perfil ambiental general donde en los escenarios S1 y S2 todos los indicadores arrojan resultados de impactos perjudiciales, en tanto en el escenario S3 todos resultan beneficiosos excepto para la categoría calentamiento global.

La Figura 7.27 muestra una comparativa de la contribución relativa de cada etapa a una de las categorías de impacto analizadas, la disminución de recursos abióticos, para los escenarios S1, S2 y S3. En la misma puede verse que solo el escenario S3 presenta beneficios ambientales, lo mismo sucede en el resto de las categorías de impacto acidificación, eutrofización y formación de foto-oxidantes.

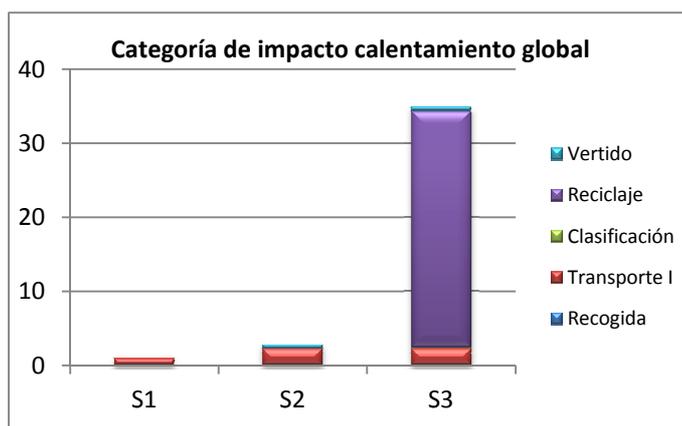


**Figura 7.27** Contribución de cada etapa al ADP en los escenarios S1, S2 y S3

La Figura 7.28 indica la contribución relativa de cada etapa a la categoría de impacto calentamiento global para los escenarios S1, S2 y S3. En los tres escenarios resulta un impacto perjudicial. Sin embargo, la magnitud de las emisiones es diferente, tal como se muestra en la Figura 7.29, resultando el impacto ambiental del escenario S3, 12 veces mayor que el S2 y 37 veces más que el S1 en la categoría analizada.

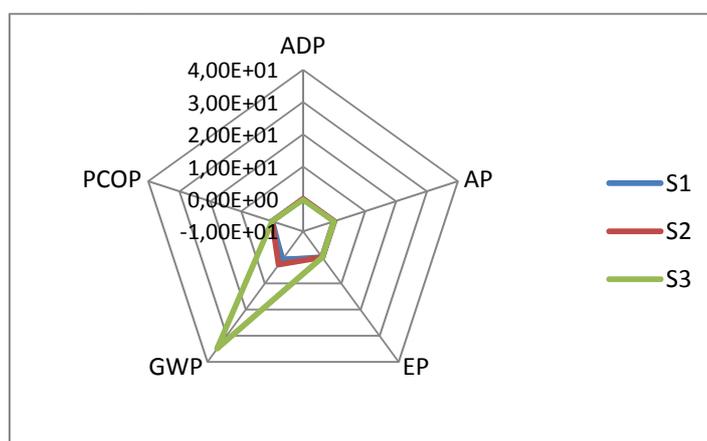


**Figura 7.28** Contribución de cada etapa al GWP en los escenarios S1, S2 y S3



**Figura 7.29** Contribución al calentamiento global de los escenarios S1, S2 y S3

La Figura 7.30 indica, para todas las categorías de impacto, la relación de la contribución de los escenarios S1, S2 y S3. Se evidencia el aumento en la contribución al impacto por calentamiento global, tal como se ha mencionado en párrafos anteriores.



**Figura 7.30** Comparación del impacto ambiental de los escenarios S1, S2 y S3

En cuanto a la categoría de uso del suelo, se presenta en la Tabla 7.31 los valores del indicador de desertificación correspondientes a cada escenario. Para el escenario S1 se han indicado todos los valores obtenidos ya que carece de sentido realizar un promedio. Es importante de destacar que respecto al uso del suelo el escenario S3 presenta el menor impacto ambiental. Con relación al escenario S2, la relación es de 4,3 veces menor y con respecto al menor de los indicadores DP calculados en el escenario S1, la relación es 566 veces menor.

**Tabla 7.31** Indicadores de Desertificación para los escenarios S1, S2 y S3

Escenario	DP (ha-año)/t RCD	
S1	Caso 1	4,82E-03
	Caso 2	3,16E-02
	Caso 3	7,14E-03
	Caso 4	1,29E-02
	Caso 5	1,39E-03
S2	3,40E-04	
S3	7,88E-05	

#### **7.2.4. Interpretación de Resultados**

La evaluación ambiental de los tres escenarios creados sobre el sistema de gestión regional de RCD en el departamento de Las Heras ha dado diferentes resultados, cuyo análisis comparativo se realiza a continuación.

Las categorías de impacto calculadas con ACV-RCD permiten visualizar ventajas desde el punto de vista ambiental de acciones de reciclaje frente al vertido controlado, tal como se observa en la Figura 7.27, excepto para la categoría calentamiento global en la que el reciclaje de la madera y el cartón-papel aportan impactos perjudiciales. Asimismo la fracción cartón-papel contribuye a impactos perjudiciales en todas las categorías de impacto. Este hecho lleva a pensar en que se necesita proponer otras alternativas de gestión para estas fracciones, conclusión coincidente en el análisis del sistema español.

Una cuestión a tener en cuenta es la influencia de las distancias a las plantas de reproceso en el reciclaje. En esta etapa se han contabilizado las cargas ambientales del tramo de transporte entre la PCRI y la planta de reproceso, y hay un punto límite en que la suma de ambas operaciones resultará igual a cero o será positiva. Esto es importante de considerar en las fracciones de metales (para todas las categorías de impacto) y para la madera (en todas las categorías excepto calentamiento global).

Respecto a la fracción inerte, es importante destacar, que a nivel regional-local y con los datos primarios obtenidos, el reciclaje resulta beneficioso para todas las categorías de impacto.

El escenario S1, en el que los RCD son abandonados muy cerca de la ciudad, es el que presenta el menor impacto para las categorías incluidas en ACV-RCD, y ello se justifica lógicamente por la poca distancia recorrida antes de su abandono. Por lo tanto, el factor de desertificación es el que argumenta la necesidad de planificar la gestión por la gran diferencia en ha-año entre el escenario S1, S2 y S3. Es decir, que la consideración del uso del suelo modifica los resultados que se obtienen al considerar categorías tradicionales, donde el menor impacto en emisiones se produce con el vertido incontrolado excepto para el calentamiento global.

La selección de las categorías que se tendrán en cuenta a los fines de decidir uno u otro sistema de gestión desde una perspectiva ambiental, dependerá de los intereses locales. No obstante la categoría calentamiento global siempre tiene importancia por las características de su alcance. También la categoría disminución del recurso abiótico puede ser tomada en cuenta por su relevancia a nivel de explotación de recursos, por ejemplo en la gestión de la madera.

### **7.3. Evaluación del fin de vida de los RCD en una obra de edificación**

Una última aplicación a realizar para validar la utilidad de ACV-RCD y la metodología que comprende, es la aplicación al caso de evaluar ambientalmente la gestión de los RCD generados durante la construcción de una obra de edificación.

#### **7.3.1. Descripción del caso**

Como estudio de caso se tomaron datos de una construcción de una obra de edificación de una sola planta, compuesta de ocho unidades destinadas a vivienda con el mismo proyecto arquitectónico, de 65 m<sup>2</sup> de superficie cubierta cada una. Las características de la edificación se muestran en la Figura 7.31.

**Figura 7.31** Tipo de viviendas del estudio de caso analizado



<sup>1</sup>Materiales y tipo de construcción de techos de losa; <sup>2</sup>Cerramientos verticales y sector de techo de madera; <sup>3</sup>Vivienda terminada; <sup>4</sup>Residuos generados

Fuente: Mercante, (2008)

Los datos de caracterización de los RCD de construcción se indican en la Tabla 7.32. La cantidad total de RCD generado es de 33,324 t para una superficie construida total de 520 m<sup>2</sup>.

**Tabla 7.32** Generación de RCD en viviendas

Clasificación	Fracción	Cantidad Total (kg)	Ic (kg/m <sup>2</sup> )	%
Inertes	Ladrillos	10628	20,50	31,8
	Mezclas	18445	35,58	55,35
	Escombro de hº	1035	2,00	3,11
	Losetas	389	0,75	1,17
Total inertes		30496	58,83	91,51
No especiales	Hierro	95	0,18	0,28
	Plásticos	69	0,13	0,21
	Papel	220	0,42	0,66
	Madera	680	1,31	2,04
	Yeso	1765	3,40	5,30
Total no especiales		2828	5,46	8,49
Total generado		33324	64,28	100,00

Fuente: (Mercante, 2008)

Para la evaluación del impacto de los RCD generados se supone que el escenario de gestión de la región donde se localiza la obra es el denominado S3, descrito en el apartado 7.2 para el departamento de Las Heras.

A tal fin, se consideraron las siguientes fracciones de residuos: inertes: 91,51%, hierro: 0,28%, madera: 2,04%, cartón-papel: 0,66 % y el resto de rechazo con 5,51%. Esta composición es la que se utilizó en el programa informático ACV-RCD para el cálculo de los indicadores de categoría de impacto.

### 7.3.2. Objetivo, alcance y unidad funcional

El objetivo de este estudio es evaluar el impacto ambiental de la gestión de los RCD generados en una obra de edificación residencial durante la etapa de construcción.

La unidad funcional es el m<sup>2</sup> de superficie construida. A esta unidad se referirán los resultados de la EICV calculados para 1t de RCD.

### 7.3.3. Inventario de ciclo de vida

El inventario de ciclo de vida corresponde al de las etapas que comprenden el escenario S3.

### 7.3.4. Evaluación del impacto de ciclo de vida

La Tabla 7.33 muestra los resultados de la evaluación de impacto del ciclo de vida calculada con ACV-RCD. Se indican dos resultados para cada indicador: los valores de los indicadores referidos a la gestión de 1 t de RCD, y los valores de los indicadores referidos a la unidad funcional de este caso de estudio, 1 m<sup>2</sup> de superficie construida. En cada categoría de impacto las emisiones se miden en la unidad correspondiente.

**Tabla 7.33** Resultados de la EICV por categoría de impacto. Caso viviendas

Indicador	Unidad	Valor
ADP	(kg Sb eq./t RCD)	1,9706E-03
	(kg Sb eq./m <sup>2</sup> )	1,2629E-04
AP	(kg SO <sub>2</sub> eq./t RCD)	-5,1308E-03
	(kg SO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup> )	-3,2881E-04
EP	(kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq./t RCD)	8,7760E-04
	(kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq./m <sup>2</sup> )	5,6241E-05
GWP	(kg CO <sub>2</sub> eq./t RCD)	3,6118E+01
	(kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup> )	2,3146E+00
PCOP	(kg de C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq./t RCD)	-1,8119E-03
	(kg de C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq./m <sup>2</sup> )	-1,1611E-04

La Figura 7.32 muestra los resultados de la tercera fila para cada categoría de impacto y por etapas. Se observa que hay contribuciones al impacto en los indicadores ADP, EP y GWP, mientras los valores de AP y PCOP presentan ahorros por la carga evitada.

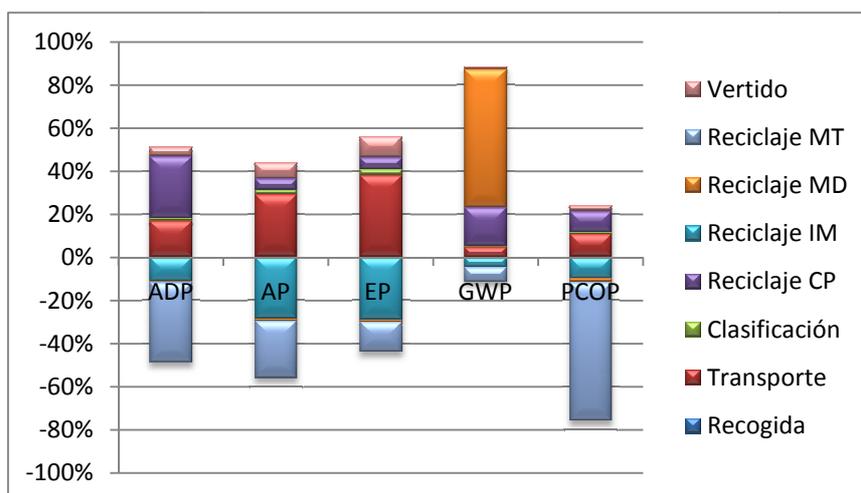


Figura 7.32 EICV de RCD generados en edificación por metro cuadrado de superficie

### 7.3.5. Interpretación de resultados

La evaluación realizada en este caso de estudio arroja unos resultados que pueden analizarse con distintas perspectivas.

En primer lugar, si se considera aisladamente la etapa de construcción de una edificación del resto del ciclo de vida de la edificación (mantenimiento, uso y demolición), los valores contribuyen al impacto total de la etapa considerada, y se pueden buscar alternativas de mejoras. Evidentemente, no se puede influir directamente sobre el sistema de gestión regional de RCD (escenario S3 en este caso), pero si pueden adoptarse otras medidas que disminuirían los impactos, tales como planes de minimización en la generación, recogida selectiva que anule los efectos de la clasificación, sustitución de materiales que generen menos impacto en la gestión, entre otras.

El segundo análisis involucra todo el ciclo de vida de la edificación. En este caso los resultados del impacto de la gestión de los RCD son parte del impacto global del ciclo de vida del edificio. Esto permite conocer en cuanto contribuye al impacto total, la gestión de RCD, y determinar su importancia relativa.

Finalmente, cabe señalar que actualmente varios proyectos y estrategias de ecodiseño aplicables a la construcción edilicia, apuntan a minimizar los impactos de los procesos involucrados en la misma, sobre los ecosistemas. En Argentina, el marco normativo es el Decreto (Poder Ejecutivo Nacional) N° 140/07, el cual declara de interés y prioridad nacional el uso racional y eficiente de la energía y aprueba los lineamientos del Programa Nacional de Uso Racional y Eficiente de la Energía (PRONUREE). Entre los proyectos de este programa, se elaboró el Programa de Ahorro y Eficiencia Energética en Edificios Públicos (PA y EEEP).

Para evaluar las estrategias de ecodiseño se han generado herramientas de evaluación para las cuales los resultados de ACV-RCD pueden ser tomados como datos de entrada en la evaluación de la etapa de construcción para aplicaciones locales, por ejemplo en la herramienta GBC 2k “Green Building Challenge 2000, Building Performance Rating System (Cole y Larsson, 2000).

#### 7.4. Conclusiones del Capítulo

La aplicación de la metodología de evaluación ambiental desarrollada en el Capítulo 4, sistematizada en el programa informático ACV-RCD, ha permitido el análisis de distintos sistemas de gestión integrada de RCD. Se ha demostrado la aplicabilidad a distintas regiones, y por lo tanto su flexibilidad.

En el caso de España se evaluaron dos sistemas de gestión ya implementados. Ambos sistemas estructurados con las mismas etapas de gestión, pero con variantes en cuanto a los datos de generación, las distancias de transporte en los distintos tramos y la tecnología de las PCRI involucradas. Los resultados permitieron realizar estudios comparativos entre ambos sistemas e identificar las etapas con mayor contribución a los impactos en cada categoría, así como los ahorros por cargas evitadas. A partir de este análisis se establecieron recomendaciones y conclusiones. La evaluación se realizó para las cinco categorías de impacto ofrecidas por ACV-RCD.

En el caso de Mendoza, Argentina, se realizó una evaluación del sistema actual de vertido incontrolado. Luego se plantearon escenarios que incluyeron etapas de recogida, transporte, reciclaje y vertido controlado. En esta ocasión la evaluación se realizó para las cinco categorías de impacto ofrecidas por ACV-RCD, y adicionalmente se evaluó la categoría de impacto por uso del suelo con un indicador regional de desertificación.

El tercer caso de aplicación, se realizó para evaluar el impacto ambiental de los RCD generados durante la construcción en una obra de edificación.

Los resultados de cada evaluación se constituyen en argumentos de decisión para la mejora y/o planificación de sistemas regionales de gestión de RCD, como así también de gestión interna en las obras de construcción y demolición.

Finalmente cabe señalar que los resultados obtenidos respecto a la evaluación ambiental de alternativas de gestión de RCD deberán compatibilizarse con aspectos socioeconómicos y técnicos en la adopción de una estrategia determinada.

## Capítulo 8. CONCLUSIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS

---

### **Resumen**

En este capítulo se presentan las conclusiones del trabajo de investigación realizado y las propuestas para la realización de futuras investigaciones.

### **8.1. Introducción**

En los capítulos que se han desarrollado en esta tesis, se ha mostrado cómo la gestión de RCD, en cada una de sus etapas de su ciclo de vida, consume recursos naturales y energéticos y produce impactos sobre el ambiente. La vinculación de estas etapas lleva a concebirlas en su conjunto como un sistema, y si al mismo tiempo se consideran todas las fracciones que se generan en el flujo de RCD, entonces es posible establecer un sistema integrado de gestión de RCD.

La concepción de la gestión de RCD como un sistema integral adopta una visión holística que abarca su ciclo de vida, desde la generación hasta su disposición final. En este contexto surge la aplicación de la técnica de análisis de ciclo de vida (ACV), que permite cuantificar los impactos ambientales que provoca.

La falta de metodologías, herramientas y datos de inventario de ciclo de vida para llevar a cabo la evaluación de un SGIRCD es lo que motivó la presente investigación. Planteadas las hipótesis y sus objetivos, se buscaron soluciones para cubrir las carencias identificadas.

En Latinoamérica los sistemas de gestión de RCD son incipientes. La evaluación ambiental de los sistemas actuales y la detección de oportunidades de mejora en la región propulsó que esta investigación prestara especial atención a la obtención de inventarios de ciclo de vida representativos y a la adopción de categorías de impacto aplicables a la región de Mendoza, Argentina.

Se presentan a continuación las principales conclusiones de cada uno de los temas abordados, para finalizar con algunas propuestas que pueden dar continuidad a este trabajo.

## **8.2. Conclusiones**

En el diseño de esta tesis se enunciaron dos hipótesis. Seguidamente, con el fin de lograr su demostración se formularon un objetivo general y seis objetivos específicos. En lo que sigue se expresan las conclusiones generales y su vinculación con la demostración de las hipótesis planteadas.

### **8.2.1 Conclusiones respecto a la metodología de evaluación ambiental de SGIRCD**

Se ha desarrollado una propuesta metodológica para la evaluación ambiental de SGIRCD con técnicas de análisis de ciclo de vida. La misma ha permitido visualizar la relación y dependencia entre cada una de las etapas incluidas, vincular las numerosas variables involucradas en los procesos unitarios y obtener una visión integral de todo el sistema de gestión.

El análisis de ciclo de vida de cada etapa del SGIRCD ha tenido distintos niveles de complejidad en el planteo de las ecuaciones a emplear. La confiabilidad de los resultados numéricos obtenidos por su aplicación a casos concretos, va a depender de los datos de inventario disponibles, pudiendo realizarse simplificaciones a costa de tener menor precisión en los resultados.

Es de destacar que al haberse planteado la metodología por etapas, permite generar un sinnúmero de escenarios de gestión, mediante la inclusión u omisión de cada una de ellas. Asimismo se pueden utilizar distintas opciones planteadas en cada etapa. Esta flexibilidad hace que pueda emplearse la metodología propuesta para modelar diferentes SGIRCD, tanto los ya implementados, como sistemas a planificar, constituyéndose en una herramienta de decisión de selección de alternativas en ambos casos.

El perfil ambiental del SGIRCD se obtiene a través de indicadores de categoría de impacto referidos a la unidad funcional de gestión de una tonelada de RCD, con una composición determinada.

Una de las fortalezas de la metodología propuesta es que es aplicable a cualquier región o país. Además, no incluye/excluye ninguna categoría de impacto, ni sus indicadores, pudiendo adoptarse las tradicionales y aquellas representativas de la región donde se aplique.

Esta metodología cumple con el objetivo general de esta tesis, siendo su aporte más significativo.

### **8.2.2 Conclusiones relativas a la caracterización de RCD**

La aplicación de la metodología de evaluación ambiental de los SGIRCD requiere, para la definición de su unidad funcional, la identificación de la composición del RCD a analizar: fracciones residuales y su distribución porcentual. Aunque no es una etapa propia de la metodología, sí es una información fundamental para poder aplicarla.

Por este motivo, se ha propuesto en esta tesis un conjunto mínimo de fracciones y un procedimiento directo para obtener los porcentajes en que se distribuyen en el flujo de RCD. El procedimiento adopta un método de muestreo aleatorio doblemente estratificado a los fines de estimar la media de los porcentajes requeridos.

La importancia de este aporte radica en que el procedimiento es directo y no requiere de bases de datos referidas a índices de generación en obras de construcción y demolición, como sí

es necesario en otras metodologías de caracterización ya publicadas. Por lo dicho, su empleo se justifica, sin ser excluyente, en regiones carentes de las bases de datos mencionada.

En el caso de aplicación al área del Gran Mendoza, Argentina se determinó una cantidad de 300 m<sup>3</sup> de RCD a caracterizar empleando el método de muestreo. Este dato queda disponible para las administraciones públicas al momento de planificar la gestión regional de los RCD.

### **8.2.3 Conclusiones relativas a los inventarios de ciclo de vida de SGIRCD**

La recopilación de datos de inventario a incluir en la aplicación de la metodología de evaluación ambiental propuesta es un tema clave, ya que la calidad de los resultados de un estudio de ACV depende, en gran medida, de la calidad de los datos de inventario incorporados al estudio. Además, la dependencia de los datos de inventario con la región geográfica donde se ubica el caso de aplicación, es otro factor primordial que influye sobre la calidad de los resultados. Los datos de inventario preferiblemente deben ser primarios (o de campo) con el fin de que representen la realidad del caso de estudio, y en el caso que no sea posible, secundarios (de bases de datos) con la precaución de adaptarlos al mismo.

La obtención de datos primarios relativos a las entradas del sistema es una tarea compleja, pues requiere introducirse en un área privada de las empresas (conocer consumos de materiales y energía, emisiones, residuos generados, etc.) y no siempre es posible contar con su colaboración por temas de confidencialidad de la información. Sin embargo, a lo largo de este trabajo se ha hecho un esfuerzo por conseguir datos primarios que corresponden a todas las etapas del ciclo de vida de un sistema de gestión de RCD, obteniendo así, datos de inventario primarios para todas las etapas de la metodología propuesta de evaluación ambiental. Se entrevistaron distintas empresas gestoras de RCD locales e internacionales. Los datos comprenden según los casos, entradas de materia prima, entradas de energía, consumos de agua, suelo ocupado, entrada de RCD. La elaboración del ICV de cada etapa se realizó a partir del procesamiento de los datos obtenidos.

Otro grupo de datos importante del ICV es el que corresponde a las emisiones o datos de salida del sistema. En este caso se requiere en ocasiones datos aún más complejos, como por ejemplo emisiones del consumo energético y de combustibles. La solución para obtener estos datos fue mixta. Por ejemplo, en el caso de la energía, se tomaron datos de bases comerciales para la producción de energías primarias y se construyó el mix eléctrico con datos regionales. Otros datos de salida como materiales recuperados se obtuvieron de las empresas gestoras de RCD.

Un caso particular lo constituyó el ICV de las cargas evitadas por reproceso de las distintas fracciones. En estos casos se aporta el ICV de acuerdo a las recomendaciones de la base de datos Ecoinvent (SCLCI, 2008), adaptado a cada región.

Finalmente, cabe señalar la importancia de los aportes realizados en cuanto a la elaboración de ICV para cada etapa del SGIRCD, tanto en datos cualitativos como cuantitativos, tomados en Argentina y España. Es posible su utilización en casos de estudio de otras regiones con las adaptaciones adecuadas.

### **8.2.4 Conclusiones referentes a las categorías de impacto de SGIRCD**

Si bien existen categorías de impacto ambiental reconocidas internacionalmente para realizar la EICV de un sistema o producto, se realizó una selección de aquellas que mejor se adecuan para la evaluación de los SGIRCD. Dicha selección se realizó a partir de criterios que tenían en cuenta el uso de categorías tradicionales convencionales, las categorías utilizadas en otros

sistemas de gestión de residuos sólidos, y fundamentalmente el tipo de actividad y las características propias de los RCD.

Por otra parte, se destacó la importancia de regionalizar las categorías y los indicadores de categorías, esto es, la adopción de aquéllos que sean representativos para la región donde se lleva a cabo el análisis del SGIRCD.

Los resultados de las consideraciones hechas en los párrafos anteriores dieron como resultado el grupo de categorías de impacto y sus indicadores que se muestran en la Tabla 8.1.

**Tabla 8.1** Categorías de impacto seleccionadas para el ACV de la gestión de RCD

Categoría	Unidad
Calentamiento global <i>GWP</i>	kg CO <sub>2</sub> eq.
Acidificación <i>AP</i>	kg SO <sub>2</sub> eq.
Eutrofización <i>EP</i>	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq.
Agotamiento de recursos abióticos <i>ADP</i>	kg Sb eq.
Oxidación fotoquímica <i>POCP</i>	kg de C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq.
Uso del suelo <i>LUP</i>	ha-año

*Fuente: Elaboración propia*

Cabe señalar que en un marco regional, se seleccionó como indicador de impacto por uso del suelo, el indicador de desertificación potencial, IDP (Civit, 2009).

Es valioso destacar, como aporte de esta tesis, que la expresión de cálculo del IDP se adaptó a la actividad “gestión de RCD” para los casos de valorización de fracciones inertes en plantas de reproceso y disposición final en terreno (vertido controlado o incontrolado), de acuerdo a las Ecuación 5.14, Ecuación 5.16 y Ecuación 5.18.

### 8.2.5 Conclusiones acerca del programa informático ACV-RCD

Se mencionó en el marco teórico de esta tesis que existen herramientas genéricas de ACV muy desarrolladas, pero que no tienen incorporados aún la posibilidad de modelar sistemas de gestión de RCD. Asimismo, se refirieron programas informáticos característicos de sistemas de gestión de residuos sólidos orientados a aquéllos de origen domiciliario y aplicables en los países de elaboración con bases de datos regionales.

Dada la necesidad de contar con una herramienta informática que fuera de ayuda al proceso de toma de decisión a la hora de seleccionar el SGIRCD más adecuado, se diseñó un programa denominado ACV-RCD, con base en la metodología de evaluación ambiental de SGIRCD propuesta y desarrollada en esta tesis.

ACV-RCD permite realizar la evaluación ambiental de SGIRCD a través de cinco indicadores de categoría de impacto (ADP, AP, EP, GWP y PCOP) que responden a la fase de evaluación del impacto del ciclo de vida. La herramienta es de sencilla aplicación, pudiendo ser empleada por usuarios con conocimiento básico de ACV, puesto que realiza todas las operaciones matemáticas automáticamente. Cuenta con datos de ICV por defecto, y el usuario con sólo ingresar algunos datos propios obtiene el perfil ambiental de todo el sistema o de cada una de sus etapas por separado.

### 8.2.6 Conclusiones sobre la aplicación de la metodología y la herramienta ACV-RCD en casos de estudio

La aplicación de la metodología de evaluación ambiental propuesta y sistematizada en el programa informático ACV-RCD, permitió el análisis de distintos sistemas de gestión integrada

de RCD en España y Argentina. Se ha demostrado la aplicabilidad a distintas regiones, y por lo tanto su flexibilidad en este sentido.

Los resultados permitieron realizar estudios comparativos entre distintos escenarios, identificar las etapas con mayor contribución a los impactos en cada categoría, así como los ahorros por cargas evitadas para las cinco categorías de impacto que ofrece el programa.

En el caso de Mendoza, Argentina, se realizó una evaluación del sistema actual de vertido incontrolado para un departamento (Las Heras) y se plantearon tres escenarios de gestión con el fin de identificar aquél que resultara óptimo desde el punto de vista ambiental. En este caso se evaluó particularmente la categoría de impacto de uso del suelo con el indicador de desertificación, cuyos resultados brindan elementos de juicio importantes para su futura planificación.

Con el objetivo de mostrar otra potencialidad de la herramienta, se evaluó el impacto ambiental de los RCD generados durante la construcción en una obra de edificación, considerando uno de los escenarios configurados.

Los resultados de cada evaluación se constituyen en argumentos de decisión para la mejora y/o planificación de sistemas regionales de gestión de RCD, como así también de gestión intraedificacional.

*Las conclusiones expresadas demuestran la primera hipótesis: “Es posible desarrollar una metodología de evaluación ambiental específica para SGIRCD que sea flexible y aplicable a distintas regiones o países” por las razones siguientes:*

- *Se desarrolló una metodología de evaluación ambiental con técnicas de ACV, aplicable específicamente a SGIRCD.*
- *La metodología propuesta es capaz de considerar distintas fracciones de RCD y es flexible al ICV que se desee incluir dentro de las etapas consideradas.*
- *La selección de las categorías de impacto se ajusta a la evaluación de un SGIRCD, sin embargo pueden incluirse otras categorías de impacto adecuadas a la región de que se trate.*
- *La aplicación de la metodología a la evaluación de SGIRCD con ACV-RCD en distintas regiones (Argentina y España) con resultados satisfactorios afirman su flexibilidad.*

*Asimismo, demuestran parcialmente la segunda hipótesis: “La solución óptima de la gestión integrada de los RCD desde el punto de vista ambiental evaluada con enfoque de ciclo de vida puede no coincidir con la aplicación de la jerarquía de residuos”, por las razones que se expresan a continuación:*

- *La evaluación del perfil ambiental de SGIRCD, tanto en España, como en Argentina, ha demostrado que la jerarquía de residuos puede pasar a segundo plano si se analiza la gestión con enfoque de ciclo de vida. En ambos casos la prioridad del reciclaje para las fracciones madera y cartón-papel, por sobre otros tratamientos con recuperación de energía o el vertido, es discutible. Los resultados mostraron que en el caso de estas fracciones las cargas del reciclaje (debidas al reproceso de los materiales recuperados) contribuyen al impacto de calentamiento global, siendo ésta una categoría de referencia internacional. De todas formas se requiere un análisis más profundo que incluya el resto de las categorías de impacto y la evaluación comparativa con otras alternativas. Por lo dicho se considera que esta segunda hipótesis solo se demuestra de forma parcial.*

### **8.3. Futuras investigaciones**

A lo largo del desarrollo de esta tesis se han obtenido resultados en los que es posible profundizar más, incluso servir de base para el desarrollo de futuras investigaciones.

A continuación se detallan las posibles líneas de investigación derivadas de los resultados alcanzados:

- Respecto a la metodología de evaluación ambiental de SGIRCD, las líneas futuras deben apuntar hacia la inclusión de otras alternativas de valorización y disposición final de RCD además de las propuestas, como por ejemplo, incineración con y sin recuperación de energía. En este sentido se adapta bien a composiciones de RCD que contengan inertes como fracción mayoritaria.
- Acerca del método para determinar la composición de los RCD, sería recomendable estudiar cómo influye en el muestreo el origen de los RCD según el tipo de obras del que provienen (construcción o demolición). El método de muestreo propuesto no distingue este aspecto.
- Con relación a los datos de inventario de ciclo de vida: en la elaboración de ICV de las etapas de un SGIRCD se identifican fundamentalmente dos posibilidades de futuras investigaciones: particularmente, el ICV de las plantas de clasificación y reproceso de inertes requieren nuevas y más recopilaciones de campo de forma que los datos puedan ser tratados estadísticamente y así generar un inventario representativo, de acuerdo a los niveles 1, 2 y 3 en que se han clasificado las plantas, que pueda ser aplicado a cualquier región.

Particularmente hay un déficit en el ICV de la etapa de vertido por las emisiones de los procesos que ocurren en el vertedero de inertes. Sobre este tema existen numerosas investigaciones, pero aún no se han determinado emisiones al aire, agua y suelo, que permitan cuantificar los indicadores ambientales.

En un marco general, las investigaciones futuras deben abordar además los aspectos económicos de los SGIRCD, ya que la evaluación de ambos aspectos, ambiental y económico, darían bases consistentes al proceso de toma de decisiones.

## Referencias

- ABNT (2004) (Asociación Brasileira de Normas Técnicas) NBR 15114 Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação
- AENOR (1999) (Asociación española de normalización y certificación) Centros de eliminación y valoración de los residuos inertes de derribo y de los demás residuos de la construcción. Especificaciones técnicas y de gestión medioambiental. Depósito Legal M 38035:1999
- Affonso F J de A (2005) Caracterização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para uso em camadas drenantes de aterros de resíduos sólidos. XXIII. 161P (COPPE – UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil) Tese Universidade Federal do Rio de Janeiro. En portugués.
- Alves de Medeiros R, Fucale S P, Póvoas Y, Gusmão A D (2009) Research characterizing the physical properties of recycled aggregate of civil construction wastes. Proceedings of the 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies (NOCMAT 2009), Bath, UK
- Anderson R, Jambeck J R, McCarron G P (2010) Modeling of Hydrogen Sulfide Generation from Landfills Beneficially Utilizing Processed Construction and Demolition Materials. Final Report. Environmental Research and Education Foundation Alexandria, VA. [http://erefdn.org/publications/uploads/H2SModeling\\_Jambeck-UNH\\_2-26-10\\_FINAL.pdf](http://erefdn.org/publications/uploads/H2SModeling_Jambeck-UNH_2-26-10_FINAL.pdf)
- Andreoni A (2010) Comunicación personal
- Aneiros Rodríguez L M (2008) Tecnología de las plantas de reciclaje de RCD y niveles tecnológicos en la UE. Revista Técnica Residuos 103, 56-64.
- Antonopoulos I S, Karagiannidis A, Tsatsarelis T, Perkoulidis G (2012) Applying waste management scenarios in the Peloponnese region in Greece: a critical analysis in the frame of life cycle assessment. Environ Sci Pollut Res DOI 10.1007/s11356-012-1139-y
- Bare J C, Norris G A, Pennington D W, McKone T (2003) TRACI The tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts. Journal of Industrial Ecology 6 (3-4): 49-78
- Begliardo H, Sánchez M, M C, Stellón OA, Garrappa S, Fornari J, Keller S (2012) Caracterización del Yeso Recuperado de Obras. VIII Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras - CINPAR 2012. [www.cinpar2012.com.ar/cd/vol3/1.pdf](http://www.cinpar2012.com.ar/cd/vol3/1.pdf)
- Begum R A, Siwara C, Pereira J J, Jaafar A H (2007) Implementation of waste management and minimisation in the construction of Malaysia. Resour Conserv Recy 51: 190-202
- Begum R A, Siwara C, Pereira J J, Jaafar A H (2009). Attitude and behavioral factors in waste management in the construction industry of Malaysia. Resources, Conservation and Recycling, 53: 321–328
- Bektas F, Wang K, Ceylan H (2009) Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability. Constr Build Mater 23: 1909–1914
- Berger M, Finkbeiner M (2010) Water Footprinting: How to Address Water Use in Life Cycle Assessment? Sustainability 2010, 2, 919-944; doi:10.3390/su2040919
- Berndt M L (2009) Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate. Constr Build Mater 23: 2606–2613
- Berger M, Finkbeiner M (2010) Water Footprinting: How to Address Water Use in Life Cycle Assessment? Sustainability 2010, 2, 919-944; doi:10.3390/su2040919
- Blengini, GA (2009) Life cycle of buildings, demolition and recycling potencial: A case study in Turin, Italy. Building and Environment 44: 319-330
- Blengini GA, Di Carlo T (2010) The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. Energ Buildings 42:869–880
- Blengini GA, Garbarino E (2010) Resources and waste management in Turin (Italy): the role of recycled aggregates in the sustainable supply mix. Journal of Cleaner Production Journal of Cleaner Production 18: 1021–1030

- Bovea MD, Ibáñez-Forés V, Gallardo A, Colomer Mendoza, FJ (2010) Environmental assessment of alternative municipal solid waste management strategies. A Spanish case study. *Waste Management* 30: 2383-2395
- Bovea MD, Powell, JC (2006) Alternative scenarios to meet the demands of sustainable waste management. *Journal of Environmental Management* 79: 115–132
- Bovea M D, Ibáñez-Forés V, Bernad-Beltrán D, Mercante I (2011) Capítulo 18: Aplicación de la metodología de análisis del ciclo de vida a la gestión de residuos sólidos. Libro: Residuos sólidos: un enfoque multidisciplinar (Ed. L. Márquez). Editorial: Libros en Red. ISBN: 978-1-59754-787-1.
- Brown A (2007) Waste Resources Assessment Toolkit for the Environment. Entec U.K.
- Bustillo M (2010) Manual de RCD y áridos reciclados. Capítulo 5, pág. 233. Ed. Fueyo Editores. Madrid. ISBN 978-84-935279-7-6
- Buttol P, Masoni P, Bonoli A, Goldoni S, Belladonna V, Cavazzuti C (2007) LCA of integrated MSW management systems: case study of the Bologna District. *Waste Management* 27: 1059–1070
- Cachim P B (2009) Mechanical properties of brick aggregate concrete. *Constr Build Mater* 23: 1292–1297
- CAMMESA (2011) Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico Sociedad Anónima. Informe anual 2011.  
<http://portalweb.cammesa.com/memnet1/Pages/descargas.aspx>. Acceso: 09/08/12
- Careli, E (2010) Empresa Obra Limpa. Comunicación personal. Sao Paulo, Brasil.
- Carneiro F P (2005). Diagnóstico e Ações da Atual Situação dos Resíduos de Construção e Demolição na Cidade do Recife. Tesis de Maestría. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil.
- Carpenter, A., Jambeck, J. R., Gardner, K. and Weitz, K. (2012), Life Cycle Assessment of End-of-Life Management Options for Construction and Demolition Debris. *Journal of Industrial Ecology*. doi: 10.1111/j.1530-9290.2012.00568.x
- Castro S de, Brito J de (2013) Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 41: 7-14
- CE (Consejo de la Unión Europea) (1999) Directiva 1999/31/CE del Consejo relativa al vertido de residuos <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31999L0031:ES:HTML>>. Acceso: 26 de agosto de 2012
- CE (Consejo de la Unión Europea) (2000). CER (Catálogo Europeo de Residuos), Decisión 2000/532/CE, de la Comisión, del 3 de mayo, modificada por las Decisiones de Comisión, 2001-118, del 16 de enero, Decisión 2001-119, del 22 de enero, y por la Decisión del Consejo 573-2001, del 23 de julio de 2001
- CE (Consejo de la Unión Europea) (2003) Decisión del Consejo 2003/33/CE, por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE. <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:011:0027:0049:ES:PDF>>. Acceso: 26 de julio de 2012
- CE (Consejo de la Unión Europea) (2006) Directiva 2006/12/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de abril de 2006, relativa a los residuos (DO L 114 de 27.4.2006), en vigor hasta el 12 de diciembre de 2010
- CE (Consejo de la Unión Europea) (2008) Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas. DO L 312 de 22.11.2008
- CEDEX (2009) (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) Actualización del catálogo de residuos utilizables en construcción. Ficha técnica 4.1. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. España.
- Cherubini F, Bargigli S, Ulgiati S (2009) Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration. *Energy* 34: 2116–212

- Cirko C, Edgecombe F H, Gagnon M, Perry G, Haight M E, Jackson D, Love G, Kelleher M, Massicotte S, Schubert J, South G, Veiga P (2000) EPIC/CSR Integrated Solid Waste Management Tools: Project Report. University of Waterloo, Canada
- Civit B (2009) Sostenibilidad ambiental. Desarrollo de indicadores para su aplicación en estudios de análisis de ciclo de vida en la región árida del centro-oeste argentino. Ph. D. Thesis, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza
- Civit B, Arena A P (2009) Land use impact assessment of arids lands: case study in the mid-west arid region of Argentina. III Conferencia Internacional de Análisis de Ciclo de Vida. Chile. ISBN 978-956-7226-08-5
- Clark C, Jambeck J, Townsend T (2006) A Review of Construction and Demolition Debris Regulations in the United States. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 36: 141-186.
- CML Bureau B&G, School of System Engineering, Policy Analysis and Management—Delft University of Technology (2001) Life cycle assessment: an operational guide to the ISO standards. Delft University of Technology, Delft. <http://www.leidenuniv.nl/cml/index.html>
- Cochran K, Townsend T, Reinhart D, Heck H (2007) Estimation of regional building-related C&D debris generation and composition: Case study for Florida, US. *Waste Manage* 27: 921–931
- Coelho A, de Brito J (2013a) Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – Part I: Energy consumption and CO2 emissions. *Waste Manage* 33: 1258–1267
- Coelho A, de Brito J (2013b) Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – Part II: Environmental sensitivity analysis. *Waste Manage* 33: 147–161
- Cole R J and Larsson N (2000) Green Building Challenge/2000 Office Building Performance Rating System, Versión 0.9g 2000 01 31, Ottawa, Canada.
- Colomer F J, Szantó-Narea M (2011) Capítulo 1: Evolución histórica. Libro: Residuos sólidos: un enfoque multidisciplinar Ed. Libros en Red. ISBN: 978-1-59754-787-1
- COM 666 (2005) Commission of the European Communities. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Taking sustainable use of resources forward: a thematic strategy on the prevention and recycling of waste. 666 final. Brussel, BE: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2005:666:FIN:EN:PDF>. Acceso 10 February 2011
- CONAMA (2002) (Consejo Nacional de Medio Ambiente de Brasil) Resolución N° 307. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Publicação DOU nº 136, de 17/07/2002, págs. 95-96. <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acceso: 26 de julio de 2012
- CONAMA (2005) (Comisión Nacional de Medio Ambiente de Chile) Política de Gestión Integral de Residuos Sólidos. [http://www.sinia.cl/1292/articles-26270\\_pol\\_rsd.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-26270_pol_rsd.pdf). Acceso: enero 2011.
- Cónsoli F, Allen D, Boustead I, Fava J, Franklin W, Jensen A, de Oude N, Parrish R, Perriman R, Postlethwaite D, Quay B, Seguin J, Vigon B (1993) Guidelines for lifecycle assessment: a code of practice, Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC)
- Cossu R (2009) Driving forces in national waste management strategies. *Waste Manage* 29 (Ed.) 2797–2798
- DEIE (2011) Dirección de Estudios e Investigaciones de Mendoza. [www.deie.mendoza.gov.ar](http://www.deie.mendoza.gov.ar)
- den Boer E, den Boer J, Jager J (2005) Waste Management Planning and Optimisation – Handbook for Municipal Solid Waste Prognosis and Sustainability Assessment of Waste Management Systems. Ibidem Verlag, Stuttgart, Germany ISBN 3-89821-519-9
- den Boer E, den Boer J, Jager J (2007) LCA-IWM: a decision support tool for sustainability assessment of waste management systems. *Waste Manage* 27 (8): 1032-1045

- Directive 2008/98/EC (2008) of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives OJ L 312: 3-30
- DNV (2012) Dirección Nacional de Vialidad de Argentina. Pesos máximos por eje permitidos para los vehículos. [http://www.vialidad.gov.ar/transporte\\_cargas/peso\\_maxeje.php](http://www.vialidad.gov.ar/transporte_cargas/peso_maxeje.php). Acceso: 30-06-2012
- Doka G (2007) Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. ecoinvent report No. 13, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf
- Domingo-Cabo A, Lázaro C, López-Gayarre F, Serrano-López M A, Serna P, Castaño-Tabares J O (2009) Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater* 23: 2545–2553
- Duran X, Lenihan H, O'Regan B (2006) A model for assessing the economic viability of construction and demolition waste recycling—the case of Ireland. *Resour Conserv Recy* 46: 302–320
- Ecobilan (1999) The Ecobilan Group. Waste integrated systems assessment for recovery and disposal. Reference Guide. Ecobilan
- Elías X Ed. (2009a) Reciclaje de residuos industriales. Cap. 1, pág 18. 2º Ed. España.
- Elías X Ed. (2009b) Reciclaje de residuos industriales. Cap. 4, pág 1017-1018. 2º Ed. España.
- Elías X Ed. (2009c) Reciclaje de residuos industriales. Cap. 2, pág 355 357. 2º Ed. España.
- Elías X Ed. (2009d) Reciclaje de residuos industriales. Cap. 6, pág 355. 2º Ed. España
- Engelsen C J, Sloot H A, Wibetoe G, Petkovic G, Stoltenberg-Hansson E, Lund W (2009) Release of major elements from recycled concrete aggregates and geochemical modelling. *Cement Concrete Res* 39: 446–459
- Esin T y Cosgun N (2007) A study conducted to reduce construction waste generation in Turkey. *Build and Environ*, 42:1667–1674
- ETH-ESU 96 (1996) Okoinventare von Energiesystemen. ESU Group, ETH Technical University of Zurich
- Eun S, Reinhart D, Cooper D, Townsend T, Faour A (2007) Hydrogen sulfide flux measurements from construction and demolition debris (C&D) landfills. *Waste Manage* 27: 220-227.
- EVE (Ente Vasco de la Energía), IHOBE S.A. (Sociedad Pública de Gestión Ambiental), ORUBIDE (Centro de gestión del suelo), VISESA (Vivienda y suelo de Euskadi) (2006) Guía de edificación sostenible para la vivienda. [http://www.visesa.com/documentos/actualidad/doc\\_144.pdf](http://www.visesa.com/documentos/actualidad/doc_144.pdf)
- Ferrari D, Pozzolo F, Ferrari, H (2008) Desarrollo de un *software* para estimación de cobertura vegetal. CobCal v2.0.0.61©. Estación Experimental Agropecuaria INTA. Concepción del Uruguay, Ruta P. 39, Km 143,5, CP 3260, CC 6, Entre Ríos, Argentina
- Fine J, Drogosbeke J (1998) Metodología de la Observación. Cuarto Seminario de Capacitación Docente. PRESTA, Universidad de Concepción. Chile
- Frischknecht R, Steiner R, Braunschweig A, Egli N, Hildesheimer G (2006) Swiss ecological scarcity method: the new version 2006, ESU-Services Ed., Suiza
- Gallardo A, Colomer F J (2011) Capítulo 2: Principios Generales de la Gestión de los Residuos Sólidos. Libro: Residuos sólidos: un enfoque multidisciplinar. Ed. Libros en Red. ISBN: 978-1-59754-787-1
- García-Piñón F, Sanfeliu T, Meseguer S, Jordán M M (2008) Restauración de canteras para su aprovechamiento como vertederos. I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Castellón. España. ISBN: 978-84-8021-665-4
- Gaskin J, Risse M, Faucette B, McLaurin W, Kastner J, Adams T (2004) Potential Environmental Risks of Onsite Beneficial Reuse of Ground Engineered Wood Wastes from Residential Construction. University of Georgia. <http://www.toolbase.org/PDF/CaseStudies./Reusewoodreport2004.pdf>. Acceso diciembre de 2012.
- GERD (2010) (Asociación de Gestores de Residuos de la Construcción y Demolición) Control de los RCD, en los Ayuntamientos. <http://www.gerd.es/wp-content/uploads/2010/12/Cuadernillo-de-Ayuntamientos.pdf>. Acceso: 15/11/12

- Goedkoop M (1995) The ecoindicator'95: final report, Pré Consultants BV Ed., Amersfoort, Países Bajos
- Goedkoop M, Spriensma R (2000) The ecoindicator'99: a damage oriented method for life cycle impact assessment: methodology report, Pré Consultants BV Ed., Amersfoort, Países Bajos.
- González Fonteboa B, Martínez F, Carro D, Eiras J (2010) Cortante-fricción de los hormigones reciclados. *Mater Construcc* Vol. 60 (299): 53-67
- Guinée J B, Gorrée M, Heijungs R, Huppes G, de Koning A, Wegener Sleswijk A, Suh S, Udo de Haes H, Brujin H, Duin R, Huijbregts M (2001) Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO Standards. Dordrecht, The Netherlands
- Guinée JB (2002) Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands
- Gusmao, A.D. (2008) Manual de Gestao dos Resíduos da Construção Civil. Capítulo 2, pág. 23-33. Gráfica Editora. Brasil. PeR-BPE 08-0644. CDD 690.22
- Hasan A R, Schindler J, Solo-Gabriele H M, Townsend T G (2011) Online sorting of recovered wood waste by automated XRF-technology. Part I: Detection of preservative-treated wood waste. *Waste Manage* 31: 688–694
- Hauschild M Z, Potting J (2004) Spatial differentiation in life cycle impact assessment: the EDIP-2003 methodology. Guidelines from the Danish EPA, Danish Environmental Protection Agency Ed., Copenhagen
- Henry J G, Heinke G W (1999) Ingeniería Ambiental. Capítulo14, pág. 574. Ed. Prentice Hall. México ISBN 970-17-0266-2
- Huete Fuertes R, Blandón González B, Rolón Aguilar J (2005) Posibilidades de aplicación del material granular obtenido a partir de residuos de construcción y demolición de hormigón y ceramic. *Tevista Técnica Residuos* 85: 32-36
- Idemat (2001) Idemat Material Database. Delft University of Technology, The Netherlands
- Ihobe (2009) Sociedad Pública de Gestión Ambiental. Guías de edificación ambientalmente sostenible. www.ihobe.net Acceso 15 de noviembre de 2011
- Iida K, Pierman J, Tolaymat T, Townsend T, Wu C (2004) Control of heavy metal emissions and leaching from incineration of CCA-treated wood using mineral sorbents. *Journal of Environmental Engineering* 1302(2): 184–192
- Imbach T, Williams A, Joye J (2004) Quarry Rehabilitation Guidelines. HGRS Report Number: MT 04/13704/E
- IteC (2008) Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña. <http://itec.es/servicios/librospdf/pdfs/>
- ITGE (2004) (Instituto Geológico y Minero de España) Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería. Estudios y Proyectos Mineros S.A.Madrid. ISBN 84-7840-019-2
- Isubo N, Sakagami M, Washida T, Kokubu K, Inaba A (2004) Weighting Across Safeguard Subjects for LCIA through the Application of Conjoint Analysis. *I J Life Cycle Assess* 9 (3): 196-205
- ISO 14040 (2006) Environmental Management. Life Cycle Assessment. Principles and Framework. European Committee for Standardization (CEN)
- ISO 14044 (2006) Environmental management – Life Cycle Assessment – Requirements and guidelines
- ISO/TR 14048 (2002) Environmental management – Life Cycle Assessment – Data documentation format
- Khoo H (2009). Food waste conversion options in Singapore: Environmental impacts based on an LCA perspective. *Science of the Total Environment* 15: 1367-1373
- Kofoworola O F, Gheewala S H. (2009). Estimation of construction waste generation and management in Thailand. *Waste Management*. 29 731–738
- ITeC (2000) (Institut de Tecnologia de Construcció de Catalunya) Plan de gestión de residuos en las obras de construcción y demolición. 1º Edición. ISBN 84- 7853- 393-1. España

- Jaillon L, Poon C S, Chiang YH (2008) Quantifying the waste reduction potential of using prefabrication in building construction in Hong Kong. *Waste Manage* doi:10.1016/j.wasman.2008.02.015
- Jambeck J, Weitz K, Solo-Gabriele H, Townsend T, Thorneloe S (2007) CCA-treated wood disposed in landfills and life-cycle trade-offs with waste-to-energy and MSW landfill disposal. *Waste Management* 27(8): 21–28
- Jefferies D, Muñoz I, Hodges J, King V, Aldaya M, Ercin A, Milà i Canals L, Hoekstra A (2012) Water Footprint and Life Cycle Assessment as approaches to assess potential impacts of products on water consumption. Key learning points from pilot studies on tea and margarine. *Journal of Cleaner Production*. 33: 155-166
- Jiménez J R, Agrela F, Ayuso J, López M (2010) Estudio comparativo de los áridos reciclados de hormigón y mixtos como material para sub-bases de carreteras. *Materiales de Construcción* doi: 10.3989/mc.2010.54009
- Jolliet O, Margni M, Charles R, Humbert S, Payet J, Rebitzer G, Rosenbaum R (2003) IMPACT 2002+: a new life cycle impact assessment methodology. *Int J Life Cycle Asses* 8(6): 324-330.
- Jolliet O, Müller-Wenk R, Bare J, Brent A, Goedkoop M, Heijungs R, Itsubo N, Peña C, Pennington D, Potting J, Rebitzer G, Stewart M, Udo de Haes H, Weidema B (2004) The LCIA Midpoint-damage Framework of the UNEP/SETAC Life Cycle Initiative. *Int J LCA* 9 (6) 394 – 404
- Kaazke J, Meneses M, Wilke B, Rotter V S (2013) Environmental evaluation of waste treatment scenarios for the towns Khanty-Mansiysk and Surgut, Russia. *Waste Manag Res* doi: 10.1177/0734242X12473792
- Kim M, Kim J (2010) Comparison through a LCA evaluation analysis of food waste disposal options from the perspective of global warming and resource recovery. *Science of the Total Environment* 408: 3998–4006
- Kirkeby J T, Hansen T L, Birgisdóttir H, Bhandar G S, Hauschild M Z, Christensen T H (2005) Environmental assessment of solid waste systems and technologies: EASEWASTE. *Waste Manage Research* 24: 3-15
- Koellner T, de Baan L, Beck T, Brandao M, Civit B, Goedkoop M, Margni M, Milà i Canals L, Müller-Wenk R, Weidema B, Wittstock B (2012) Principles for life cycle inventories of land use on a global scale. *Int J Life Cycle Assess* DOI 10.1007/s11367-012-0392-0
- Kofoworola O F, Gheewala S H. (2009). Estimation of construction waste generation and management in Thailand. *Waste Management*. 29 731–738
- Kou S C, Poon C S (2009) Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates. *Constr Build Mater* 23: 2877–2886
- Kreith F, Tchobanoglous G (2002) *Handbook of solid waste management*, Ed. McGraw-Hill, NY.
- Lee S, Xu Q, Booth M, Townsend T, Chadik P, Bitton G (2006) Reduced sulfur compounds in gas from construction and demolition debris landfills. *Waste Manage* 26:526-533
- Life Project Appricod Guide (2006) *Towards Sustainable Plastic Construction and Demolition Waste Management in Europe*. [http://ec.europa.eu/environment/life/themes/waste/documents/guide\\_appricod.pdf](http://ec.europa.eu/environment/life/themes/waste/documents/guide_appricod.pdf). Acceso Diciembre 2012
- Llamas S, Mercante I, Martinengo P (2011). Reinserción de un antiguo basural para uso agrícola en la provincia de Mendoza, Argentina. 4to Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Encuentro Nacional de Expertos en Residuos Sólidos. D.F. México. ISBN 978-607-607-015-4
- Llatas, C (2011) A model for quantifying construction waste in projects according to the European waste list. *Waste Manag* 31(6):1261-76. doi: 10.1016/j.wasman.2011.01.023.
- Lu W, Yuan H (2011) A framework for understanding waste management studies in construction. *Waste Manage* 31: 1252–1260

- Lu W, Yuan H, Li J, Hao J, Mi X, Ding Z (2011) An empirical investigation of construction and demolition waste generation rates in Shenzhen city, South China. *Waste Manage* 31: 680–687
- Lund H (1996) Manual McGraw-Hill de Reciclaje. Cap. 20 Residuos de construcción y demolición. España
- Lund H (1996) Manual McGraw-Hill de Reciclaje. Capítulo 3: Residuos de construcción y demolición. España
- Mália M, Brito J de, Pinheiro M D, Bravo M (2013) Construction and demolition waste indicators. *Waste Manag Res* doi: 10.1177/0734242X12471707
- MARM (2008) (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino) Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición de España 2008-2015. Texto aprobado por Acuerdo de Consejo de Ministros de 26-12-2008. Boletín Oficial del Estado N.º 49 del 26-02-2009, sección I, pp. 19893-20016
- Marques Sampaio A M, Cynamon Kligerman D, Ferreira Júnior S (2009) Dengue, related to rubble and building construction in Brazil. *Waste Manage* 29: 2867–2873
- Martinez Bertrand C (2008) Gestión de residuos de construcción y demolición (RCDS): importancia de la recogida para optimizar su posterior valorización. Vías y Construcciones S.A. <[http://www.conama9.org/conama9/download/files/CTs/2633\\_CMartinez.pdf](http://www.conama9.org/conama9/download/files/CTs/2633_CMartinez.pdf)> Acceso: 31 de julio de 2012
- Martínez Lage I, Martínez Abella F, Vázquez Herrero C, Pérez Ordóñez J L. (2010). Estimation of the annual production and composition of C&D Debris in Galicia (Spain). *Waste Manage*, 30: 636–645
- McDougall F, White P, Franke M, Hindle P (2001) *Integrated Solid Waste Management: a Life Cycle Inventory*, (second edition) Blackell Science Ltd.
- McDougall F, White P, Franke M, Hindle P (2004) *Integrated Solid Waste Management: A Life Cycle Inventory*. Oxford, UK
- Meadows D H, Meadows D L, Randers J (1992) *Beyonds the limits: Global Collapse or Sustainable Future?* Earthscan Publications, LTD, Londres
- Meadows D H, Meadows D L, Randers J, Bechrens (1972) *The Limits to Growth: A Report to the Club of Rome's Poryect on the Predicament of Mankind*. Universe Books. New York
- Medeiros Souza P (2009) *Gestao de residuos da Construção civil em canteiros de obras de edificios multipiso na cidade do Recife/ PE. Dissertação (Mestrado)*. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. Brasil. CDU: 711.4 (043.2)
- Mercante I (2005) *Impacto ambiental de los residuos de construcción y demolición. Alternativas de gestión*, Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Cuyo.
- Mercante I (2008). *La gestión de residuos en obras de edificación: un desafío hacia la produccion limpia*. I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Castellón. España. ISBN: 978-84-8021-665-4
- Mercante I, Magistocchi, L M, Llamas S, Salomón M, Martinengo P (2009a) *Relevamiento y diagnóstico de áreas impactadas por residuos de la construcción y demolición en el Gran Mendoza. Estudio de caso: Las Heras*. II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos, Colombia. CD-ROM . ISBN: 978-958-741-006-8.
- Mercante I, Arena P, Bovea Edo M (2009b) *Evaluación de alternativas de RCD con consideraciones de ciclo de vida*. II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos, Colombia, ISBN: 978-958-741-006-8
- Mercante I, Martinengo P, Llamas S, Rojo J, Poncio F (2010) *Aspectos ambientales de obras civiles de edificación. Gestion de residuos de construcción*. III Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Joao Pessoa, Brasil. ISBN 978-85-7745-589-8. [www.redisa.uji.es/](http://www.redisa.uji.es/) Acceso 16/07/12
- Mercante I, Bovea M D, Llamas S (2011) *Residuos Sólidos: Un enfoque multidisciplinario*. Capítulo 15: Residuos de construcción y demolición. Colección: Ecología y Medio Ambiente. Primera edición en español versión digital. Libros en red. ISBN: 978-1-59754-787-1. México

- Milà i Canals L, Bauer C, Depestele J, Dubreuil A, Freiermuth Knuchel R, Gaillard G, Michelsen O, Müller-Wenk R, Rydgren B (2007) Key elements in a framework for land use impact assessment within LCA. *Int J Life Cycle Assess* 12 (1) 2-4
- MPR (2008) (Ministerio de la Presidencia de España) Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición. BOE 38, pag. 7724-7730
- MPR (2011) (Ministerio de la Presidencia de España) Ley 22/2011. BOE-A-2011-13046
- Niskanen A, Manfredi S, Christensen T, Anderson R (2009) Environmental assessment of Ämmässuo Landfill (Finland) by means of LCA-modelling. *Waste Management and Research* 27: 542-550
- Nita C, Pileggi R G, Cincotto M A, John V M (2010) Estudo da reciclagem do gesso de construção. *Ambiente Construído, Porto Alegre*, v. 10, n. 1, p. 103-119
- Núñez M, Civit B, Muñoz P, Arena A P, Rieradevall J, Antón A (2010) Assessing potential desertification environmental impact in life cycle assessment. Part 1: Methodological aspects. *Int J Life Cycle Assess* 15:67–78. DOI 10.1007/s11367-009-0126-0
- Ohio EPA (Environmental Protection Agency) (2009) An Evaluation of Leachate from Ohio's Construction and Demolition Debris Landfills. [http://www.epa.ohio.gov/Portals/34/document/newspdfs/n\\_cdd\\_leachate\\_evaluation.pdf](http://www.epa.ohio.gov/Portals/34/document/newspdfs/n_cdd_leachate_evaluation.pdf). Acceso: diciembre 2012
- Ortiz O, Pasqualino J C, Castells F (2010) Environmental performance of construction waste: Comparing three scenarios from a case study in Catalonia, Spain. *Waste Management* 30 (4): 646-654
- Othman S N, Noor Z Z, Abba A H, Yusuf R O, Hassan M A A (2013) Review on life cycle assessment of integrated solid waste management in some Asian countries. *Journal of Cleaner Production*, 41: 251-262
- Padmini A K, Ramamurthy, K , Mathews M S (2009) Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater* 23: 829–836
- Perez L., C. (2005) Muestreo estadístico. Pearson Education S.A. Madrid. España. 348 pp.
- Petkovic G, Haoya A, Engelsen C J, Breedveld G, Moen S, Aaboe R, Jorgensen T, Thue Unsgard G (2006) Acceptance limits for the content of pollutants in recycled materials in road construction. Noruega <http://www.vegvesen.no/attachment/110438/binary/192521>. Acceso: 15/12/12
- Pinheiro S M (2011) Gesso reciclado : avaliação de propriedades para uso em componentes. Tese doutorado. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br>
- Pinto T de P (1999) Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. São Paulo, 189p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.
- Pinto T de P (2005) Coordenador. Gestão ambiental de resíduos da construção civil: a experiência do Sinduscon-SP. São Paulo: Obra Limpa: I&T: Sinduscon-SP.48p. [http://www.sindusconsp.com.br/downloads/Manual\\_Residuos\\_Solidos.pdf](http://www.sindusconsp.com.br/downloads/Manual_Residuos_Solidos.pdf) Acceso: 16/07/12
- Plaza C, Xu Q, Townsend T, Bitton G, Booth M. (2007) Evaluation of Alternative Landfill Cover Soils for Attenuating Hydrogen Sulfide from C&D Debris Landfills. *Environmental Quality* 84(3):314-332. doi:10.1016/j.jenvman.2006.06.001.
- PRE Consultants (2004) SimaPro 6-Introduction to LCA with SimaPro. Amersfoort. The Netherlands. <http://www.pre.nl>
- Pré Consultants BV (2011) SimaPro 7.3, Amersfoort, The Netherlands
- RD 2822 (1998) Real Decreto 2822/1998, por el que se aprueba el Reglamento General de Vehículos. Anexo IX. Masas y dimensiones. (Incluye las modificaciones introducidas por la Orden PRE/3298/2004, de 13 de octubre y por la Orden PRE/52/2010, de 21 de enero). España
- Rebollada Casado E (2009) Obras en antiguas canteras de los Santos de Maimona (Extremadura). *Retema* 139: 66-70
- REE (2010) Red Eléctrica de España, El sistema eléctrico español (in Spanish).

- Ribeiro A S (2006) Produção de gesso reciclado a partir de resíduos oriundos da construção civil. Dissertação (mestrado) - UFPB/CT, Joao Pessoa. UFPB/BC. CDU: 666.9(043)
- Rigamonti L, Grosso M, Sunseri MC (2009) Influence of assumptions about selection and recycling efficiencies on the LCA of integrated waste management systems. *Int J Life Cycle Assess* 14: 411–419
- Rivela B, Moreira M T, Muñoz I, Rieradevall J, Feijoo G (2006) Life cycle assessment of wood wastes: A case study of ephemeral architecture. *Science of the Total Environment* 357 1-11.
- Rivera Mera CJ (2007) Análisis de impacto ambiental por la inadecuada disposición de residuos de la construcción y demolición en el valle de México y propuestas de solución. Tesis Maestría (Maestría en Ingeniería Ambiental)-UNAM, Facultad de Ingeniería. México. Acceso por comunicación personal.
- Rivera Valdovinos C L (2009) Análisis ambiental para el mercado de los residuos de la construcción en la zona metropolitana de la Ciudad de México. Tesis Maestría (Maestría en Ingeniería Ambiental)-UNAM, Facultad de Ingeniería. México. Acceso por comunicación personal.
- Rolón Aguilar J C, Nieves Mendoza D, Huete Fuertes R, Blandón González B, Terán Gilmore A, Pichardo Ramírez R (2007) Caracterización del hormigón elaborado con áridos reciclados producto de la demolición de estructuras de hormigón. *Materiales de Construcción* 57 (288):5-15.
- SAEFL (1998) (Swiss Agency for the Environment, Forest and Landscape) BUWAL 250. Life Cycle Inventory for Packagings, Volume I and II. Environmental Series No.250/I and II, Berne, Switzerland.
- Saheri S, Mir M A, Basri N E A, Mahmood N Z B, Begum R A (2012) Life Cycle Assessment for Solid waste disposal options in Malaysia. *Pol J Environ Stud* 21 (5): 1377-1382
- Sathre R (2007) Life-Cycle Energy and Carbon Implications of Wood-Based Products and Construction. Mid Sweden University Doctoral Thesis 34. ISBN 978-91-85317-67-7. ISSN 1652-893X. Canada
- Sathre R, O'Connor J (2010) A synthesis of research on wood products and greenhouse gas impacts. Vancouver, Canada
- SCLCI (2008) (Swiss Centre for life cycle inventories). Centre ecoinvent database v2.0, <http://www.ecoinvent.org>
- SMA (2003) (Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal de México) 8 de octubre de 2003. Ley de Residuos Sólidos para el Distrito Federal que regula las disposiciones de la LGPGIR de alcance nacional [en línea]. En: Diario Oficial de la Federación. <<http://www.contraloria.df.gob.mx/prontuario/vigente/r2381.htm>>. (Acceso: 20 de julio de 2012).
- SMA (Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal de México) (2006) 12 de julio de 2006. Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-007-RNAT-2004, que establece la clasificación y especificaciones de manejo para residuos de la construcción en el Distrito Federal [en línea]. En: Gaceta Oficial del Distrito Federal de México. <http://www.sma.df.gob.mx/sitia/download/marco%20normativo/NADF-007-RNAT-2004.pdf> Acceso: 20 de octubre de 2010
- Solís, J., Marrero, M., Montes, M.V., Ramírez-de-Arellano, A., 2009. A Spanish model for quantification and management of construction waste. *Waste Manage* 29: 2542–2548
- Solo-Gabriele H, Townsend T, Hahn D, Moskal T, Hosein N, Jambeck J, Jacobi G (2004) Evaluation of XRF and LIBS technologies for on-line sorting of CCA-treated wood waste. *Waste Management* 24(4): 413–424.
- Sousa J G G, Bauer E, Sposto R M (2003) Empleo de residuos de la Construcción Civil como áridos reciclados. Producción de bloques de hormigón. *Mater Constr* 53: 271-272
- Spoerri A, Langa D, Bindera C R, Scholza R W (2009) Expert-based scenarios for strategic waste and resource management planning—C&D waste recycling in the Canton of Zurich, Switzerland. *Resour Conserv Recy* 5: 592-600

- Steen B (1999) A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Version 2000. General system characteristics. CPM report 1999:4, Chalmers University of Technology Ed., Göteborg, Suecia.
- Steen B (2001) Identification of significant environmental aspects and their indicators. Sweden Centre of Environmental Assessment of Products and Material Systems, and Dept. of Environmental Systems Analysis, Chalmers University of Technology, Gothenburg. CPM report nr 2001:7. [http://www.cpm.chalmers.se/document/reports/01/2001\\_7.pdf](http://www.cpm.chalmers.se/document/reports/01/2001_7.pdf). Acceso nov. 2012
- Stenmarck A, Oddou M, Sundqvist J (2009) Using LCA-tool WAMPS in waste management planning. II Conferencia Internacional de Análisis de Ciclo de Vida en Latinoamérica. Pucón, Chile
- Tabsh S W, Abdelfatah A S (2009) Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Constr Build Mater* 23: 1163–1167
- Tam V W Y, Tam C M (2006) Evaluations of existing waste recycling methods: A Hong Kong study. *Build Environ* 41:1649–1660
- Tam V W Y, Tam C M (2007) Crushed aggregate production from centralized combined and individual waste sources in Hong Kong. *Constr Build Mater* 21: 879–886
- Tam V W Y (2008) Economic comparison of concrete recycling: A case study approach. *Resour Conserv Recy* 52: 821-828
- Tam (2009) Comparing the implementation of concrete recycling in the Australian and Japanese construction industries. *J Clean Prod* 17: 688-702
- Tam V W Y, Tam L, Le K N (2010) Cross-cultural comparison of concrete recycling decision-making and implementation in construction industry. *Waste Manage* 30: 291-297
- Tarantini M, Loprieno AD, Cucchi E, Frenquellucci F (2009) Life Cycle Assessment of waste management systems in Italian industrial areas: Case study of 1st Macrolotto of Prato. *Energy* 34: 613-622
- Tchobanoglous G, Theisen H, Vigil, S (1994) Gestión integral de residuos sólidos. Vol.1. Capítulo 4. Ed. Mc Graw Hill. ISBN 84-481-1766-2
- Townsend T G, & Kibert C (1998) The Management and Environmental Impacts of Construction and Demolition Waste in Florida. State University System of Florida, Florida. Center for Solid and Hazardous Waste Management. Gainesville: State University System of Florida. [http://www.hinkleycenter.org/images/stories/publications/Townsend\\_97-7.pdf](http://www.hinkleycenter.org/images/stories/publications/Townsend_97-7.pdf). Acceso diciembre 2012.
- Townsend T G, Jang Y, Thurn L G (1999) Simulation of Construction and Demolition Waste Leachate. *Journal of Environmental Engineering* 125 (11):1071-1081
- Townsend TG, Solo-Gabriele H M, Tolaymat T, Stook K (2003) Impact of Chromated Copper Arsenate (CCA) in Wood Mulch. *The Science of the Total Environment* 309: 173-185
- Triola M. (2004). Estadística. 9a ed. Pearson Educación S. A. México. 648 pp
- Tunesi S (2011) LCA of local strategies for energy recovery from waste in England, applied to a large municipal flow. *Waste Management* 31(3): 561-71
- UE (Unión Europea) (2001) VI Programa de la Unión Europea en material de medio ambiente 2001-2012. [http://europa.eu/legislation\\_summaries/agriculture/environment/l28027\\_es.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/agriculture/environment/l28027_es.htm). Acceso 15/01/2013
- UNEP (1992) World Atlas of Desertification, United Nations Environmental Program, ISBN 340555122.
- UNEP (United Nations Environmental Programme) (1996) International Source Book on Environmentally Sound Technologies for Municipal Solid Waste Management. International Environmental Technology Centre Technical Publication Series (6)
- US EPA (Draft 1995a) Construction and Demolition Waste Landfills. US EPA, Office of Solid Waste. <http://www.epa.gov/osw/hazard/generation/sqg/const/cdrpt.pdf>
- US EPA. (Draft 1995b) Damage Cases: Construction and Demolition Waste Landfills. US EPA, Office of Solid Waste. <http://www.epa.gov/osw/hazard/generation/sqg/damages/dam-pdf/damage.pdf>

- US EPA (Environmental Protection Agency) (1998) Characterization of Building Related Construction and Demolition Debris in the United States, EPA 530-R-98-010. <<http://www.epa.gov.ar>>. Acceso: 26 de julio de 2012
- US EPA (Environmental Protection Agency) (2006a) Solid Waste Management and Greenhouse Gases. A Life Cycle Assessment of Emissions and Sinks
- US EPA (Environmental Protection Agency) (2006b) Standards of performance for new stationary sources and emission guidelines for existing sources: Large municipal waste combustors. Final rule. Federal Register 71(90): 27324–27348.
- US EPA (Environmental Protection Agency) (2010) WARM Waste Reduction Model. <https://www.epa.gov/warm>. Acceso 24 de enero de 2011
- Vegas I, Azkarate I, Juarrero A, Frías M (2009). Diseño y prestaciones de morteros de albañilería elaborados con áridos reciclados procedentes de escombros de hormigón. Mater Construc 59 (295): 5-18
- Viana K S da C L (2009) Metodologia simplificada de gerenciamento de resíduos sólidos em canteiros de obras. Dissertação (Mestrado) – UFPB/CCT. CDU: 62:711(043). João Pessoa
- Wang J Y, Touran A, Christoforou C, Fadlalla H. (2004). A systems analysis tool for construction and demolition wastes management. Waste Management 24 989–997
- WCED (1987) World Commission on Environment and Development, 1987: Our Common Future. World Commission on Environment and Development. Oxford, New York.
- Weber W, Jang Y, Townsend T, Laux S (2002) Leachate from land disposed residential construction waste. J Environ Eng 237-245
- Weitz K, Nishtala S, Thomeloe S (2000) Towards sustainable waste management using a life-cycle management decision support tool. Proceedings of the WASTECON 2000, Cincinnati, Ohio, October 23-26.
- WIA-2 (1999) Second Working Group on Life Cycle Impact Assessment of SETAC-Europe Editorial committee of WIA-2: Helias A. Udo de Haes (chairman), Olivier Jolliet (vice-chairman), Göran Finnveden, Michael Hauschild, Wolfram Krewitt, Ruedi Müller-Wenk Best Available Practice Regarding Impact Categories and Category Indicators in Life Cycle Impact Assessment. Int. J. LCA 4 (3): 167-174
- Yuan H, Shen L (2011) Trend of the research on construction and demolition waste management Waste Manage 31: 670–679
- Zabalsa Bribián I, Valero Capilla A, Aranda Usón A (2011) Life cycle assessment of buildings materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the ecoefficiency improvement potential. Build Environ 46:1133–1140

### **Páginas web consultadas**

- [www.epa.gov](http://www.epa.gov) Environmental Protection Agency U.S.
- [www.epa.ohio.gov](http://www.epa.ohio.gov) Environmental Protection Agency Ohio
- [www.gerd.es](http://www.gerd.es) Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición
- [www.redisa.uji.es](http://www.redisa.uji.es) Red de Ingeniería Sanitaria y Ambiental
- [www.magrama.gob.es/](http://www.magrama.gob.es/) Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino de España
- [www.concretosrecicladados.com.mx/](http://www.concretosrecicladados.com.mx/) Concretos Recicladados S.A
- [www.mma.gov.br](http://www.mma.gov.br) Ministerio de medio Ambiente de Brasil
- [www.ihobe.net](http://www.ihobe.net) Sociedad Pública de Gestión Ambiental
- [www.tesisenred.net/](http://www.tesisenred.net/)
- [www.cybertesis.net/](http://www.cybertesis.net/)
- [www.elsevier.com/](http://www.elsevier.com/)
- <http://lca.jrc.ec.europa.eu/> Página de la unión europea con base de datos de ICV pública
- [www.cordis.lu/en/home.html](http://www.cordis.lu/en/home.html) CORDIS, UE Community Research and Development Information Service
- [www.itec.es/](http://www.itec.es/) Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña

## *Referencias*

[www.iisbe.org](http://www.iisbe.org) International Initiative for a Sustainable Built Environment

<http://ec.europa.eu/> Página de la Comisión Europea

[www.agromarc.com.ar/normativa.php](http://www.agromarc.com.ar/normativa.php)

[www.contenur.com/](http://www.contenur.com/)

[www.gruporavi.es](http://www.gruporavi.es)

[www.jimeca.com](http://www.jimeca.com)

[www.grupopereto.com](http://www.grupopereto.com)

[www.cesur.com](http://www.cesur.com)

[www.gencat.cat](http://www.gencat.cat) (Página de la Generalitat de Catalunya, España)

[www.concretos reciclados.com](http://www.concretos reciclados.com)

[www.tecrec.com](http://www.tecrec.com) (España)

[www.salmedinatri.com](http://www.salmedinatri.com) (España)

[www.cogersa.es](http://www.cogersa.es)

[www.retema.es](http://www.retema.es) Revista Técnica de Medio Ambiente