

TESIS DOCTORAL

Evaluación económica y ambiental del uso y mantenimiento de edificios

Alejandro Martínez Rocamora



Dirigida por:
Dra. Madelyn Marrero Meléndez
Dr. Jaime Solís Guzmán



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS II

TESIS DOCTORAL:

**EVALUACIÓN ECONÓMICA Y AMBIENTAL DEL
USO Y MANTENIMIENTO DE EDIFICIOS**

Tesis presentada por **Alejandro Martínez Rocamora** para
optar al Grado de Doctor en Ingeniería de Edificación por la
Universidad de Sevilla

Dirigida por:
Dra. Madelyn Marrero Meléndez
Dr. Jaime Solís Guzmán

*A mi familia y amigos,
porque aunque esto me ha mantenido
alejado de casa, cada vez que vuelvo
veo que, de algún modo, aún sigo allí.
Y a ti, cariño, por acompañarme en esta fase
de mi ciclo de vida.
Lo más duro ha sido no poder prestarte
la atención que mereces.*

Agradecimientos

Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento con unas breves palabras a aquellas personas que han participado de este trabajo, a veces sin saberlo:

A mi directora, la Dra. Madelyn Marrero, por apostar por mí, poner orden en el papel y en la cabeza, y aportar su alegría a un trabajo muy serio.

A mi co-director, el Dr. Jaime Solís, por saber encontrar siempre el lado positivo de las cosas y dar unas palabras de ánimo cuando se necesitan.

A Miguel León, por acogerme, atenderme, y ser un ejemplo de disposición y voluntad de ayudar.

A Ana Arias, de la Unidad de Limpieza de la Universidad de Sevilla, por acercar la realidad de su oficio, probablemente uno de los más importantes, al mundo de la investigación.

A mis compañeros, por soportar mis pensamientos en alto y alegrar el trabajo diario llenando la sala de risas.

Al Departamento de Construcciones Arquitectónicas II, porque en este tiempo me han hecho sentir parte de una gran familia.

RESUMEN Debido a un diseño poco reflexivo de los edificios en cuanto a los costes mantenimiento, hoy en día hay edificios extremadamente costosos en este aspecto, tanto económica como ambientalmente hablando. Con el fin de reducir estos excesos, es necesario desarrollar una base de costes con la que se puedan estimar los recursos requeridos para limpiar y mantener los edificios. En esta tesis se presenta una metodología para estimar esos costes y el impacto ambiental, en términos de Huella Ecológica (HE), asociados al consumo de suministros, tareas de limpieza, y mantenimiento y renovación de los elementos constructivos durante la vida útil de los edificios. Dadas las numerosas peculiaridades identificadas para este tipo de actividades comparado con la construcción de edificios, es necesario definir una nueva metodología de cálculo, con sus propias hipótesis y formulación. Esta metodología se aplica después al caso de estudio de una residencia de estudiantes con capacidad para 139 residentes. Los resultados distribuyen la HE anual del edificio (74,28 hag/año) en un 7,24 % para las labores de limpieza, un 16,20 % para el mantenimiento, y el restante 76,56 % para el consumo de suministros, el cual se traduce casi íntegramente en huella de carbono. Los costes económicos, sin embargo, están dominados por la limpieza, con un 64 %. El consumo de suministros y el mantenimiento suponen un 20 % y un 16 % respectivamente. Sin tener en cuenta el consumo de suministros, los resultados alcanzan un reparto uniforme entre las seis categorías de HE debido a la gran necesidad de mano de obra para estas actividades. El desarrollo de esta metodología es esencial para la cuantificación detallada del coste económico y el impacto ambiental de la fase de uso y mantenimiento de los edificios. Se utilizan tasas de actualización de moneda y HE para expresar los resultados en términos del año actual.

ABSTRACT Due to poor design of buildings in terms of maintenance, there are a number of buildings today that remain extremely expensive to maintain, both economically and environmentally. In order to mitigate these overheads, the development of a cost database is needed with which the resources required to clean and maintain buildings can be estimated. This thesis presents a methodology to estimate these costs and the environmental impact, in terms of Ecological Footprint (EF), associated to the utility consumption, cleaning tasks and maintenance and renovation of constructive elements during the service life of buildings. Given the numerous peculiarities identified for this type of activity compared to the construction of buildings, it is necessary to define a new methodology of calculation, with its own assumptions and formulae. This methodology is the applied to the case of a college dormitory that houses up to 139 residents. The results show that cleaning tasks account for 7.24 % of the annual EF of the building (74.28 gha/yr), while maintenance accounts for 16.20 % and the remaining 76.56 % for utility consumption, which almost totally translates into carbon footprint. On the other hand, the economic costs are dominated by cleaning (64 %). Utility consumption and maintenance account for 20 % and 16 % respectively. Without taking into account the utility consumption, the results are equally divided among the six categories of productive land due to the great requirements of manpower for these activities. The development of this methodology is essential for the detailed quantification of the costs and environmental impact of the use and maintenance phase of buildings. Discount rates are used to express costs and environmental impact in terms of the current year.

Todos los días moría tal vez un centenar de vacas por Ankh Morpork. También un rebaño de ovejas y una piara de cerdos [...] Todos los días se ponían cuarenta mil huevos para la ciudad [...] Y eso era ahora. De donde él venía, la ciudad era el doble de grande. [...] No era una ciudad, era un proceso, un peso sobre el mundo que distorsionaba el terreno en cientos de kilómetros a la redonda. Había gente que no la había visto en la vida y sin embargo pasaba todos sus días trabajando para ella. Formaban parte de ella miles y miles de acres verdes, y también bosques. Ella los atraía hacia sí y los consumía, y a cambio devolvía el estiércol de sus corrales y el hollín de sus chimeneas, así como el acero y sartenes y todas las herramientas con que se preparaba su comida. Y también ropa, y modas e ideas y vicios interesantes, y canciones y conocimiento y algo que, si se miraba bajo la luz adecuada, se llamaba civilización. Aquello era lo que significaba civilización. Significaba la ciudad.

(Sir Terry Pratchett, extracto de Ronda de noche, 2002)

Everyday, maybe a hundred cows died for Ankh Morpork. So did a flock of sheep and a herd of pigs [...] Everyday, forty thousand eggs were laid for the city [...] And that was now. Back home, the city was twice as big. [...] It wasn't a city, it was a process, a weight on the world that distorted the land for hundreds of miles around. People who'd never see it in their whole life nevertheless spent their life working for it. Thousands and thousands of green acres were part of it, forests were part of it. It drew in and consumed, and gave back the dung from its pens and the soot from its chimneys, and steel, and saucepans, and all the tools by which its food was made. And also clothes, and fashions and ideas and interesting vices, songs and knowledge and something which, if looked at in the right light, was called civilization. That's what civilization meant. It meant the city.

(Sir Terry Pratchett, extract from Night Watch, 2002)

Índice general

1. Introducción	1
2. Estado de la cuestión	3
2.1. Indicadores ambientales aplicados a edificación	3
2.2. Aplicación de indicadores ambientales a la edificación	10
3. Justificación y objetivos	17
4. Metodología	19
5. Modelo teórico	23
5.1. Conceptos básicos de la Huella Ecológica	25
5.2. Límites del sistema	34
5.3. Clasificación sistemática	45
5.4. Banco de Cuantificación de Recursos	60
5.5. Modelo de cálculo de Huella Ecológica	63
5.6. Costes y HE en escenarios a largo plazo	79
6. Estudio de caso	83
6.1. Partes constitutivas	84
6.2. Procesos de la fase de uso y mantenimiento	86
6.3. Consumos en servicio	88
7. Resultados	89
7.1. Consumo de suministros y superficie	89
7.2. Limpieza del edificio	90
7.3. Mantenimiento y renovación	92
7.4. Fase de uso y mantenimiento	93
7.5. Análisis de sensibilidad	95
8. Conclusiones	99
9. Futuras líneas de investigación	103
Bibliografía	105
Índice de figuras	117
Índice de tablas	119

Nomenclatura

121

Capítulo 1

Introducción

La situación actual del sector de la construcción en España es de casi completa paralización en lo que a obras de nueva planta se refiere. En la etapa de la “burbuja inmobiliaria” se edificó tanta vivienda que muchas de ellas quedaron vacías, los precios han descendido año tras año, y cualquiera que tenga el capital suficiente puede elegir entre un amplio abanico de opciones.

En los últimos años, el grueso de la actividad se centra en el mantenimiento, reforma y rehabilitación de los edificios existentes. Estos cambios han hecho que el gestor de edificios o Facility Manager (FM) se convierta en una figura de gran importancia. Encargado del control y coordinación del funcionamiento del edificio, el FM necesita herramientas que faciliten su trabajo y que le permitan optimizar costes.

Por otro lado, el estudio del impacto ambiental de los edificios también ha adquirido mayor importancia. La mayoría de estudios, más centrados en la fase de construcción, estiman el impacto del uso de los edificios por medio de simulaciones energéticas. Estos dejan de lado la limpieza y el mantenimiento al considerar que provocan impactos menores. En esta tesis se propone un método para el cálculo pormenorizado de los costes e impacto ambiental correspondientes a la fase de uso y mantenimiento de edificios, incluyendo el consumo de suministros, las tareas de limpieza, y el mantenimiento y renovación de los elementos constructivos.

La cuestión es: ¿tiene la sociedad actual interés en este tipo de estudios? A priori podría parecer que no, y puede que esto sea cierto para una fracción considerable de la población, pero lo cierto es que cada día más gente se muestra preocupada por las acciones que afectan al medio ambiente. La sociedad ve cómo aumenta la frecuencia de los desastres naturales, el deterioro de la capa de ozono, o la extinción de especies, y no se puede evitar pensar que el planeta se resiente. Lo cierto es que cualquier intento de disminuir el daño que causamos en el medio ambiente realmente le importa a la mayoría de las personas, y por tanto esta clase de estudios tiene sentido. Quizás esto sea lo que inspira que a la presente tesis se le dé un enfoque orientado a la facilidad de implantación del modelo

en la sociedad actual, fomentando desde un primer momento la facilidad de comprensión de los planteamientos por cualquier persona.

El presente trabajo se organiza de la siguiente manera. En primer lugar se lleva a cabo una revisión del estado de la cuestión, centrado en la variedad de indicadores ambientales disponibles, y en los modelos estimación del impacto ambiental de la fase de uso y mantenimiento de edificios. Vistas las investigaciones existentes hasta la fecha, se fijan los objetivos de este trabajo y la metodología a seguir para lograrlos.

Tras una introducción al indicador Huella Ecológica (HE) con definiciones de los principales conceptos se pasa a establecer los límites del sistema, aclarando cuál es la duración considerada para la fase de uso y mantenimiento y qué fuentes de impacto se estima que deben quedar incluidas en este análisis.

El siguiente paso, dado que no existe un banco de costes pormenorizado y de acceso abierto que contemple las tareas de limpieza y mantenimiento, consiste en desarrollar una estructura o clasificación sistemática para los costes de dicha fase. Esta misma estructura y sistema de desarrollo de precios sirve para desglosar los recursos necesarios en materiales, mano de obra y maquinaria, elementos que es necesario cuantificar para la aplicación de indicadores ambientales como la HE.

A continuación se determina la formulación y datos auxiliares necesarios para la adaptación y aplicación del indicador HE a esta fase del ciclo de vida de los edificios. Debido a la gran duración de dicha fase, se establecen escenarios de evolución del impacto ambiental y el valor de la moneda, de modo que sea posible aplicar tasas de actualización a los mismos según el año en que se produzcan.

Por último, el modelo se aplica a un caso concreto: una residencia universitaria con capacidad para 139 residentes. Los resultados obtenidos para este edificio se analizan, siempre teniendo en cuenta que es el único ejemplo al que se ha aplicado el modelo, y por tanto los resultados obtenidos no serán extrapolables, aunque sí permitirán comparar con la etapa de construcción en términos de orden de magnitud.

Finalmente se extraen algunas conclusiones de todo el trabajo y se plantean futuras líneas de investigación, teniendo en cuenta para ello los objetivos planteados, las circunstancias encontradas durante el desarrollo del modelo, y el análisis de los resultados.

Capítulo 2

Estado de la cuestión

En referencia a los objetivos establecidos, se lleva a cabo una revisión del estado de la cuestión, principalmente en dos aspectos. En primer lugar se analizan los indicadores ambientales existentes, en particular aquellos de posible aplicación en el sector de la edificación, lo que permitirá entender con mayor claridad el porqué de la elección del indicador Huella Ecológica sobre otras alternativas. Además, de algunos de los indicadores revisados se pueden extraer conceptos interesantes que podrían ser de utilidad para la futura evolución del modelo que se pretende diseñar.

A continuación, se estudian los distintos modelos o planteamientos que han surgido a lo largo de los últimos años orientados a la estimación del impacto ambiental de la edificación. Del gran número de estudios existentes, destacar que la mayoría se limitan a la fase de construcción, que ciertamente es la más intensiva en un corto periodo de tiempo. En este trabajo, el análisis se centra únicamente en aquellos que contemplan de una manera u otra la fase de uso y mantenimiento.

2.1. Indicadores ambientales aplicados a edificación

En general, se puede decir que actualmente existen dos tipos de indicadores ambientales [1]. Los primeros son los indicadores de estado de presión, que utilizan unidades físicas convencionales. Normalmente evalúan factores muy localizados, de manera que obtienen una información de primer nivel que debe ser procesada a posteriori para llegar a una información más sintetizada. Algunos ejemplos son BREEAM (Reino Unido) y LEED (EEUU), que proporcionan una lista de indicadores para comparar rendimientos de edificios e impactos ambientales.

Los segundos son los indicadores de sostenibilidad, que proporcionan una evaluación general integrando múltiples fenómenos que podrían no estar rela-

cionados. Los indicadores de sostenibilidad global se obtienen procesando datos relativos a distintos parámetros a través de algoritmos basados en la termodinámica. Ejemplos de este tipo de indicadores son el Análisis de Emergía, la Huella Ecológica, o la Huella de Carbono, que se explican a continuación, entre otros.

Entre las revisiones de indicadores ambientales recientemente realizadas destacan dos. En la primera, centrada en indicadores de aplicación a nivel corporativo, se detecta una falta de conocimiento de cómo pueden utilizarse conjuntamente para alcanzar una evaluación más completa y significativa [2]. La segunda está enfocada a indicadores aplicados al análisis ambiental de un territorio, y cuenta con un análisis comparativo de diferentes métodos de acuerdo a unos parámetros de evaluación, entre los que se encuentran la metodología, el modelado del sistema, los elementos que entran en los cálculos, los indicadores que proporcionan, y la usabilidad [3].

Según estos estudios, los distintos indicadores se pueden clasificar según su procedencia de alguno de los siguientes métodos de análisis:

- Energy Flow Analysis (EFA): Análisis de flujo de energía.
- Material Flow Analysis (MFA): Análisis de flujo de materiales.
- Life Cycle Assessment (LCA): Análisis de ciclo de vida.
- Human and Environmental Risk Assessment (HERA): Análisis de riesgo humano y ambiental.
- Land-based Indicators: Indicadores con una dimensión territorial.

2.1.1. Análisis de Flujo de Energía

El Análisis de flujo de energía, o Energy Flow Analysis (EFA), además de los flujos de energía, contempla todas las entradas de materiales transformándolos en energía a través de su valor calorífico bruto, que refleja la cantidad total de energía que se podría ganar potencialmente con la combustión de los mismos. Entre los indicadores basados en EFA podemos encontrar:

- Energy analysis: Análisis de Energía.
- Exergy analysis: Análisis de Exergía.
- Emergy analysis: Análisis de Emergía.

El primero determina la energía directa e indirecta requerida para producir un bien o servicio [4]. Este indicador está estrechamente relacionado con el concepto de Demanda de Energía Acumulada o Cumulative Energy Demand (CED), método muy extendido en los análisis de consumo energético de procesos. Sin embargo, estos indicadores fallan al describir los impactos derivados del consumo de las diferentes fuentes de energía, por lo que se considera que no

puede competir con otros en cuanto al número de aspectos ambientales considerados.

La exergía se define como la máxima cantidad de trabajo que se puede obtener de un sistema cuando se lleva al equilibrio con un entorno de referencia, o dicho de manera más sencilla, la porción de la energía utilizada que se podría convertir en trabajo [5]. Este indicador resulta altamente complejo tanto de analizar como de entender, y por tanto no es una opción a tener en cuenta en este estudio, ya que se pretende conseguir un modelo de cálculo de sencilla aplicación y fácilmente entendimiento.

La emergía es un concepto definido por Odum en 1988 como la energía solar necesaria directa o indirectamente para obtener un producto, y se mide en julios solares de emergía (seJ) [6]. Se calcula por medio de la “transformidad”, un factor expresado en seJ/J que indica la emergía necesaria para producir una unidad de la energía utilizada. Este método de análisis se ha aplicado ya para materiales de construcción [7], edificios [8] y soluciones constructivas [9], sin embargo, la dificultad para obtener los datos necesarios para los cálculos y la complejidad de los mismos, así como el hecho de que los resultados que arroja sean difícilmente palpables para la sociedad de a pie, hacen que no sea un método de uso recomendado salvo en casos dirigidos a personal científico especializado.

2.1.2. Análisis de Flujo de Materiales

El Análisis de Flujo de Materiales, o Material Flow Analysis (MFA) es un planteamiento centrado en el uso de los diferentes materiales para las actividades humanas, y se basa en los conceptos de equilibrio material y energético. Algunos indicadores basados en el MFA son:

- Direct Material Consumption (DMC): Consumo Directo de Material.
- Direct Material Input (DMI): Entrada Directa de Material.
- Domestic Processed Output (DPO): Salida Procesada Doméstica.
- Ecological Network Analysis (ENA): Análisis de Red Ecológica.
- Ecological Rucksack (ER): Mochila Ecológica.
- Material Input per Unit Service (MIPS): Entrada de Material por Unidad de Servicio.
- Net Addition to Stock (NAS): Adición Neta al Stock.
- Physical Input-Output Table (PIOT): Tabla de Entradas y Salidas Físicas.
- Physical Trade Balance (PTB): Balance de Intercambio Físico.

De estos, el más interesante para su aplicación en la edificación es el indicador MIPS, desarrollado por el Wuppertal Institute for Climate, Environment and

Energy [10]. Consiste en contabilizar las entradas de material, agua y aire necesarias durante el ciclo de vida completo de un producto. Sería por tanto similar al inventario de un Análisis de Ciclo de Vida. Se ha estudiado el consumo de recursos naturales en dos edificios universitarios aplicando esta metodología [11], y resultó tener un buen potencial para identificar las medidas a adoptar para reducir el consumo de recursos naturales durante las diferentes fases de la vida del edificio.

Por desgracia, los indicadores tipo MFA en general no distinguen entre los diferentes tipos de recursos, de manera que las toneladas de todos los materiales tienen el mismo impacto, y esto no cumple con las necesidades requeridas [12]. Aunque no contempla todos los aspectos de este tipo de estudios, algunos autores [13] lo proponen como parte de un conjunto de indicadores que los cubra todos.

Por su parte, DMC y ER son conceptos interesantes en cuanto al método de cálculo. ER es la suma de todos los materiales que no están físicamente incluidos en el producto final, es decir, la entrada de materiales menos la masa del producto final. Por tanto se podría decir que mide la cantidad de material “desperdiciado”. DMC suma los materiales de procedencia nacional consumidos por un país a los materiales importados, y finalmente resta los materiales exportados. Este concepto es extrapolable a una obra de edificación o a la fabricación de un producto.

Como una variación de los anteriores están los métodos de Análisis de Flujo de Sustancias, o Substance Flow Analysis (SFA). En este caso, los datos se clasifican en entradas, salidas y existencias o stocks, y con ello se pretende identificar los flujos de una sustancia dada, así como el origen de los mismos [14].

En esta rama de indicadores se han desarrollado estudios del flujo de metales concretos, o incluso de nitrógeno, pero uno de los análisis más interesantes de cara al análisis de la edificación es el de la Huella de Agua o Water Footprint (WF). Este modelo está basado en el concepto de agua virtual, desarrollado por Allan en 1998 [15]. Unos años después, Hoekstra y Hung establecieron una metodología para el cálculo de la Huella de Agua [16], quedando definida como el volumen total de agua utilizado para producir los bienes y servicios consumidos por la sociedad. En estos cálculos se incluye la retirada de agua de ríos, lagos y acuíferos (agua azul), y en ocasiones el agua de lluvia absorbida por los cultivos (agua verde).

En definitiva, el concepto de Huella de Agua complementa a la Huella Ecológica cubriendo una de sus carencias, pero no es tan sencilla su aplicación debido a la dificultad de imputar el consumo de agua a un tipo de territorio productivo. La posibilidad de utilizarlo en este estudio se discutirá en la sección correspondiente, así como ya lo consideraron otros investigadores al hablar de una “Familia de Indicadores de Huella” [17].

2.1.3. Análisis de Ciclo de Vida

El planteamiento de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) o Life Cycle Assessment (LCA) considera todos los flujos de materiales y energía a lo largo del ciclo

de vida de un producto o servicio. Normalmente se utiliza una metodología “de la cuna a la tumba”, aunque en ocasiones se dan variaciones como “de la cuna a la cuna”, o “de la cuna a la puerta”, que es la más comúnmente utilizada en las bases de datos de ACV [18]. Un ACV se lleva a cabo en cuatro fases principales:

1. Definición de objetivos y ámbito.
2. Análisis de inventario.
3. Análisis de impactos.
4. Interpretación.

Al finalizar la segunda fase del ACV se decide de qué manera se quieren representar los resultados y los impactos en los que se desea centrar el análisis. Durante las fases de análisis de impactos e interpretación surge el concepto de indicador ambiental, que intenta sintetizar información de diversa procedencia en un resultado único comparable con los de otros estudios. Algunos de los impactos típicos tienen un efecto local en el medio ambiente, como por ejemplo el smog fotoquímico y la eutrofización, y otros tienen una naturaleza más global, como el agotamiento de ozono y el calentamiento global [19].

Los indicadores de ACV más utilizados son:

- Eco-indicator 99.
- CML 2001.
- ReCiPe.
- EDIP 2003.
- Carbon Footprint (CF): Huella de Carbono.

Los cuatro primeros son conocidos como indicadores multi-criterio, ya que expresan los resultados en forma de distintos impactos. En general, estos indicadores describen ampliamente los impactos ambientales de un proceso o producto, pero al mismo tiempo hacen el análisis más complejo y menos intuitivo [2].

Por otro lado, ha surgido una ramificación del ACV centrada en las emisiones de CO₂ equivalente que ha tenido gran acogida en el entorno empresarial por su utilidad como herramienta para la planificación energética y como método de marketing. Este indicador es la Huella de Carbono, que mide la cantidad total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) causada directa e indirectamente por un individuo, evento, organización o producto, y viene expresado en unidades de masa de CO₂ equivalente [20]. Algunos investigadores sostienen que, en términos de masa, los GEI suponen el mayor flujo de salida de los sistemas industriales [21]. El indicador se considera equivalente a la categoría de Calentamiento Global Potencial o Global Warming Potential (GWP) de los ACV, y se calcula usualmente siguiendo las metodologías GHG Protocol y PAS 2050 [22].

Este indicador será revisado convenientemente en el presente estudio, ya que al contabilizar las emisiones de otros GEI además del CO₂, puede complementar al indicador Huella Ecológica. En el correspondiente apartado se verá que esta decisión no es tan sencilla, pues en la Huella Ecológica se utiliza el terreno de absorción de CO₂ como área productiva asociada a este impacto, pero esos terrenos no tienen por qué coincidir con los que serían necesarios para absorber el resto de GEI.

2.1.4. Análisis de Riesgo Humano y Ambiental

Los Indicadores de Análisis de Riesgo Humano y Ambiental (Human and Environmental Risk Assessment (HERA)) consisten en un proceso estandarizado para estimar la magnitud, probabilidad e incertidumbre de efectos adversos, para la salud humana o para los ecosistemas, resultantes de la exposición a sustancias presentes en el ambiente [23]. Normalmente, los indicadores de análisis de riesgo se calculan siguiendo cuatro pasos: identificación del riesgo, evaluación de la relación dosis-respuesta, estimación de la exposición, y caracterización del riesgo. Una vez hechos estos cálculos, se estima si es necesario tomar medidas para la mitigación del riesgo o no [3].

Dos ejemplos de este tipo de indicador son el Cociente de Peligro o Hazard Quotient (HQ), y el Riesgo de Cáncer o Cancer Risk (CR), aunque existen modelos para cientos de contaminantes. Al tratarse de un análisis de impacto muy específico se consigue un alto grado de precisión. Por ello, la utilización de los HERA está indicada para complementar evaluaciones de procesos o productos que implican la presencia de contaminantes tóxicos, la cual justificaría un análisis más exhaustivo.

Aunque estos indicadores de alguna manera son aplicables en edificación, no son los idóneos para calcular el impacto producido por un edificio residencial durante su vida útil, pues no tienen en cuenta los recursos materiales y energéticos consumidos, entre otros.

2.1.5. Indicadores con una dimensión territorial

Los conocidos como Land-based indicators están basados en el concepto de apropiación de recursos naturales, estableciendo unos límites a los que el planeta o el territorio considerado es capaz de llegar, tanto para producir esos recursos como para absorber residuos y emisiones contaminantes. Posteriormente se calculan cuantitativamente el consumo de recursos y los residuos y emisiones generados, y se comparan con los límites antes definidos.

Algunos ejemplos de indicadores con una dimensión territorial son:

- Environmental Space (ES): Espacio Medioambiental.
- Ecological Footprint (EF): Huella Ecológica (HE).
- Dissipation Area Index (DAI): Índice de Área de Disipación.

El sistema de Espacio Medioambiental fue desarrollado por Opschoor y Reinders en 1991 [24], basándose en planteamientos de Horst Sieber. En este método se utiliza un indicador distinto para cada recurso en lugar de agruparlos todos en uno como en la Huella Ecológica. El Espacio Medioambiental supondría la base de la que parten el resto de los pertenecientes a esta rama de indicadores territoriales.

La Huella Ecológica se ideó en torno al concepto de capacidad de carga, definida como la máxima población de una especie dada que puede mantenerse indefinidamente en un hábitat específico sin perjudicar la productividad de ese hábitat. Mathis Wackernagel y William Rees definieron la Huella Ecológica en 1996 como el área necesaria para proporcionar los recursos consumidos y absorber las emisiones y residuos generados por una población dada [25], es decir, que consiste en invertir el concepto de capacidad de carga, y en lugar de la población que puede soportar un territorio productivo, calcular el territorio productivo que requiere una población concreta.

En cuanto a la validez de un concepto como el de la Huella Ecológica y similares existen opiniones enfrentadas, normalmente centradas en la simplificación de cálculos que supone. Por un lado, unos autores opinan que una herramienta simple y fácil de usar, y basada en un concepto que atrapa, tiene más oportunidades de ser adoptada por el público general [20], o que cuando una métrica es relevante, entendible y fiable, entonces puede influir en la elección del consumidor y en las acciones legislativas y reguladoras [26]. Respecto a este tema, la agregación en un único indicador normalmente proporciona un mayor entendimiento por parte del público general [27].

Por otro lado, hay que tener en cuenta que los métodos que expresan sus resultados a través de un conjunto de indicadores pueden ser preferibles, ya que evitan el típico problema de solape de impactos ambientales entre varias categorías [28]. Algunos autores piensan que la agregación es un proceso subjetivo que suele estar basado en fuertes hipótesis con tal de mostrar los resultados en una única unidad [13]. Sin embargo, también es cierto que las contribuciones de las diferentes categorías de la Huella Ecológica se pueden estudiar por separado, ayudando de esta manera a identificar los problemas que habría que abordar en primer lugar [29].

En definitiva, el indicador Huella Ecológica cuenta con unas ventajas e inconvenientes, como cualquier otro indicador. A lo largo de multitud de revisiones se han identificado deficiencias y posibles soluciones a las mismas, las cuales serán comentadas durante el desarrollo del presente trabajo.

El Índice de Área de Disipación se considera una modificación de la Huella Ecológica, que sustituye la capacidad de carga del planeta por la capacidad de asimilación de la ecosfera, y el área productiva requerida por el área de disipación. Se trata de una inversión del planteamiento de la Huella Ecológica, ya que en lugar de estimar los flujos de salida de las actividades humanas que se pueden tolerar con una capacidad de asimilación dada, se calcula la capacidad de asimilación necesaria para abarcar unos flujos de salida dados [30]. La principal diferencia entre ambos planteamientos es que el Índice de Área de Disipación tiene en cuenta la absorción de cierto tipo de sustancias no incluidas en la Huella

Ecológica, ya que no se consideran sostenibles ni pertenecientes a ciclos cerrados de la naturaleza, como pueden ser los metales pesados [2].

En la presente tesis, como ya se ha mencionado anteriormente, se ha escogido el indicador Huella Ecológica para su aplicación a la fase de uso y mantenimiento de edificios. Esta elección se hace principalmente en base a su sencillez de uso y entendimiento, ya que se busca que el modelo aquí desarrollado sea fácilmente aplicable por los profesionales del sector, que en general no cuentan con conocimientos científicos suficientes para aplicar o comprender otro tipo de indicadores de los expuestos en esta revisión.

2.2. Aplicación de indicadores ambientales a la edificación

En las últimas dos décadas se han publicado multitud de modelos de cálculo del impacto de un edificio durante su ciclo de vida. La metodología más utilizada es la de Análisis de Ciclo de Vida, ya sea presentando los resultados con los indicadores habituales del ACV (acidificación, eutrofización, calentamiento global, etc.), o limitándose a hacer un cómputo del consumo de energía. La mayoría de estos estudios se pueden consultar en diversas revisiones llevadas a cabo en los últimos años [31–34].

De entre todos, en esta revisión se mencionan aquellos que tienen en cuenta el uso y mantenimiento del edificio o que emplean el indicador Huella Ecológica, pues existen muchos modelos centrados en la fase de construcción, y algunos otros en el reciclaje durante la fase de demolición, ambos fuera de los límites del presente estudio.

2.2.1. Estudio de la fase de uso y mantenimiento

Uno de los primeros modelos conocidos es el de Bekker [35], que define claramente los flujos de materiales y energía que se dan durante el ciclo de vida del edificio, contando con la posibilidad de reciclaje de materiales o reutilización de componentes (Figura 2.1). También prevé un flujo de entrada de materiales para el mantenimiento del edificio durante su fase de uso, aunque no contempla la mano de obra en la construcción del mismo ni en las labores de mantenimiento. Buchanan y Honey [36], sin embargo, utilizan un modelo simplificado en el que, en lo relativo a la fase de uso, incluyen solamente la cantidad de energía necesaria para calentar las estancias hasta alcanzar las condiciones de confort.

No hacen así Cole y Kernan [37], que computan la energía necesaria para mantener el edificio así como la energía operacional (iluminación, electricidad, calefacción, ventilación y aire acondicionado). Dichos autores distinguen entre pequeñas reformas, como el repintado, cambio de lámparas, puertas, etc., y las rehabilitaciones completas del edificio, y tienen en cuenta que aquellos pequeños arreglos que sean necesarios al aproximarse el fin de vida del edificio probablemente no se harán. También es interesante el hecho de que comenten la probable

2.2. Estudio de la fase de uso y mantenimiento

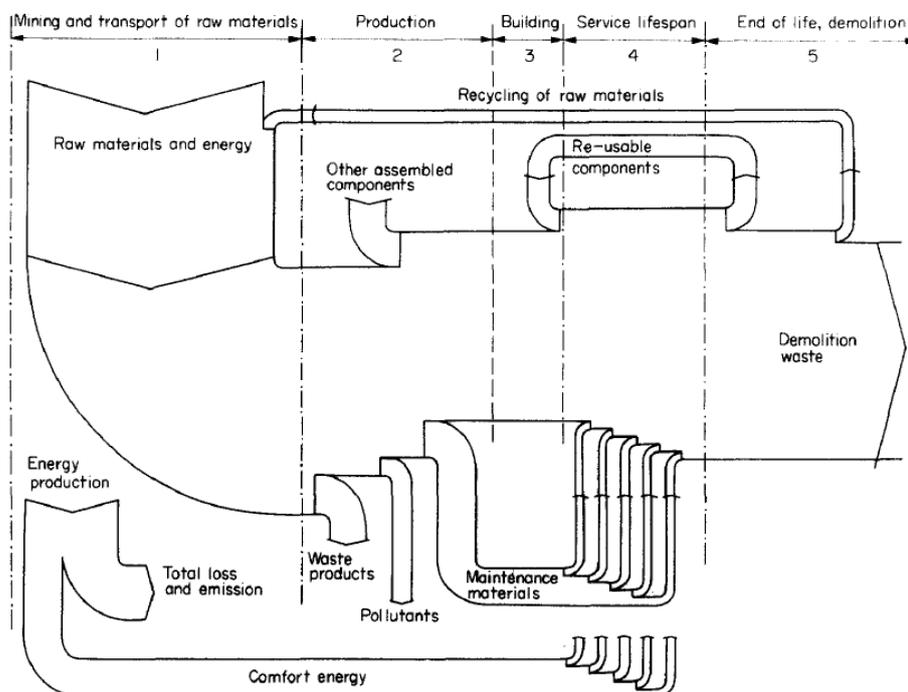


Figura 2.1: Flujos de materiales y energía en el ciclo de vida de un edificio. Fuente: Bekker (1982).

reducción de la intensidad energética de los materiales con el paso de los años, ya que suponiendo un ciclo de vida del edificio entre 50 y 100 años, la evolución de la industria con certeza mejorará los procesos de producción.

Respecto al consumo de energía por el uso del edificio, remarcan la posibilidad de variación del mismo dependiendo de la elección de los materiales de cerramiento, los patrones de uso del edificio, la eficiencia de la iluminación y los sistemas de climatización, y por último el clima y la estación. En su caso de estudio, estiman el consumo de energía mediante un software de simulación, llegando a un resultado de entre un 80 % y un 90 % de la energía total del ciclo de vida del edificio correspondiente al uso, aunque señalan que se trata de una situación temporal hasta que se reduzca el consumo operacional y la atención deba centrarse en la energía incorporada inicial de los materiales.

En 1997, Adalberth [38] intenta estudiar el consumo energético durante el ciclo de vida del edificio. Para ello lo divide en las tres fases clásicas (producción, gestión y destrucción), con una subdivisión que comprende la fabricación de los materiales, su transporte a la obra, la construcción del edificio, la ocupación del mismo con un periodo intermedio dedicado a la renovación, para terminar con la demolición y residuos o reciclaje (Figura 2.2). Además supone una vida útil de 50 años sin que sufra grandes cambios que puedan afectar al consumo, excepto las labores normales de mantenimiento.

Los datos de energía incorporada de los materiales estaban basados en un

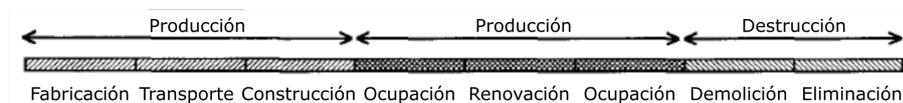


Figura 2.2: Fases del ciclo de vida completo de un edificio. Fuente: Adalberth (1997a).

informe técnico de 1993 *et al.* [39], pero actualmente se utilizan para este fin las bases de datos de Análisis de Ciclo de Vida, e introduce en la formulación un coeficiente de pérdidas de material, que en el caso del Banco de Costes de la Construcción de Andalucía [40] y otras herramientas para elaborar mediciones de edificios ya viene incluido en cada precio. Como los datos de ACV de materiales suelen seguir un modelo “de la cuna a la puerta”, es decir, que se contabilizan los impactos desde la extracción del material hasta la salida de la fábrica, quedarían sin contabilizar el transporte a la obra y la ejecución de los elementos constructivos, por lo que Adalberth asume unos costes energéticos en términos de combustible para el transporte de los materiales en los trayectos fábrica-obra (para construcción y renovación), y obra-vertedero (para renovación y demolición). Estos datos se obtienen de un estudio de Tillman *et al.* que trata sobre materiales de empaquetado [41], y que incluso distingue entre el uso de camiones para grandes y cortas distancias.

El número de renovaciones de los materiales viene dada por la división de la vida útil estimada para el edificio entre la vida útil del material menos 1, ya que en el último periodo antes de la demolición del edificio no es necesario renovar el elemento. Por último, la energía consumida durante la ocupación del edificio se calcula por medio de un software sueco llamado Enorm que se basaba en la temperatura media exterior, la transmitividad de los cerramientos, puentes térmicos, filtraciones de aire, orientación de las ventanas, sistema de calefacción, y ventilación del edificio, obteniendo finalmente un consumo medio de energía al año, que posteriormente se multiplica por los años de vida útil del edificio. El modelo en cuestión es bastante exhaustivo, aunque carece de algunos datos como la recuperación energética de la reutilización, reciclaje o combustión de los residuos.

De los casos de aplicación de este modelo [42] se desprende que alrededor del 90% de la energía consumida durante el ciclo de vida completo del edificio corresponde a la fase de uso y mantenimiento, el 10% aproximadamente a la fase de construcción, en concreto por la manufactura de materiales, y el consumo en la demolición resulta casi insignificante en comparación con el resto. No hace falta decir que estos resultados, que vienen siendo confirmados por diversos autores [31, 43], suponen justificación suficiente para el presente estudio.

En contraposición a estos datos, aunque la mayoría de los estudios confirman que el consumo de energía durante la fase de uso es de lejos el mayor contribuyente al impacto ambiental de todo el ciclo de vida del edificio, en algunos casos se puntualiza [44–46] que en lo relativo a los nuevos edificios de bajo consumo energético, la importancia relativa de las distintas fases está cambiando. Según Huberman y Pearlmutter [47], la energía incorporada puede suponer en estos

casos hasta el 60 % del total de la energía durante el ciclo de vida, por lo que con la evolución de los edificios hacia un consumo operacional menor, la atención se desviará en un futuro próximo hacia la reducción de la energía incorporada en los materiales utilizados.

Blanchard y Reppe analizan una vivienda en Michigan [48] ciñéndose a aquellos factores directamente relacionados con la construcción, consumo de energía durante el uso, mantenimiento, demolición del edificio y vertido de los residuos. Los datos de energía incorporada de materiales proceden de la base de datos DEAM, y se puede destacar el cálculo estimativo de la frecuencia de algunas labores de mantenimiento. Para la fase de uso se utilizó un software de simulación energética estadounidense llamado Energy-10, que más adelante pasaría a llamarse Energy Plus. En la simulación se asumió una ocupación menor durante el día, y por contra una ocupación casi permanente durante el fin de semana. Este estudio sería publicado más adelante junto con Keoleian contando con algunas mejoras a los cálculos [49].

Fay *et al.* y Treloar *et al.* [50, 51] analizan el consumo energético durante la vida útil de dos viviendas australianas teniendo en cuenta, en lo que respecta a la fase de uso del mismo, la energía primaria necesaria para calefacción y refrigeración, cocina, electrodomésticos e iluminación, así como el mantenimiento de ciertos elementos de la vivienda, como son la pintura, el tejado, la solería y los azulejos. Al igual que Blanchard y Reppe, utilizan un software de simulación energética, y desprecian la fase de demolición del edificio al considerar que en la mayoría de los casos resulta insignificante en comparación con la energía inicial y la operacional.

Peuportier [52] lleva a cabo un Análisis de Ciclo de Vida comparativo de viviendas unifamiliares en Francia utilizando los datos de energía, transporte y fabricación de materiales procedentes del proyecto francés REGENER y del Oekoinventare de Rolf Frischknecht (en la actualidad parte de la base de datos Ecoinvent), un software de simulación energética para la fase de uso, y diseñando la herramienta EQUER de evaluación ambiental de edificios, la cual sigue existiendo actualmente.

Pulselli *et al.* [1] llevan a cabo una adaptación de este modelo de cálculo para utilizar la metodología de Análisis de Emergía (Emergy Analysis) en lugar del indicador Huella Ecológica, además de ampliar el ámbito del estudio para abarcar también la fase de uso y mantenimiento del edificio. En este caso, al igual que Adalberth [38], en la rama de mantenimiento tienen en cuenta los flujos de energía y materiales para mantener el valor del edificio constante en el tiempo, sin que sufra degradación. En la parte de uso, se considera el consumo de electricidad, gas y agua para iluminación, cocina y climatización. Aunque esta metodología se actualiza unos años después para aplicarla a sistemas de fachada ajardinada [9], contiene algunas hipótesis interesantes, entre las que destacan:

- Uso de un ratio de 125 kcal por hora por trabajador para el cálculo de la energía gastada por los obreros.
- Estimación del impacto de las labores de mantenimiento mediante un ratio

impacto/dinero (que incluye energía, maquinaria, trabajo de los operarios, y materiales), la vida útil de los elementos, y una hipótesis de vida útil del edificio de 50 años.

- Limitación del mantenimiento a ventanas, hojas metálicas, sistemas de desagüe, pavimentos y revestimientos, y yeso, ya que consideran que son los elementos que sufren un desgaste con el tiempo y deben ser reemplazados o mantenidos.
- Uso de tasas de gasto de electricidad, gas y agua por apartamento, dando su correspondiente importancia al agua porque supone consecuentemente una generación de aguas grises, a la vez que requiere energía para hacerla llegar a las viviendas.

Blengini desarrolla en 2009 un estudio [43] abarcando también las tres fases del ciclo de vida del edificio, pero centrándose principalmente en la fase de demolición del mismo, pues el aspecto que intenta tratar es el aprovechamiento de los residuos de demolición. Sin embargo, en el desarrollo de este modelo es interesante fijarse en aquellos procesos y elementos que tiene en cuenta y aquellos que excluye:

- En la fase que llama de “pre-uso”, contabiliza la fabricación y transporte de los materiales, así como la construcción de la envolvente del edificio. Se excluyen los conductores de cobre, las tuberías, calefacciones y otro equipamiento por no haber conseguido datos fiables. Sí que están incluidos los sanitarios. Los muebles, equipamiento de cocina y otros elementos móviles tampoco se incluyen. En la fase de construcción se consideraron los diferentes procesos en términos de consumo de energía y residuos de la construcción.
- En la fase de uso, con una vida útil de 40 años, los términos a contabilizar fueron el consumo de energía para calefacción, aire acondicionado, producción de agua sanitaria, iluminación y cocina, pero los datos de consumo se obtuvieron de estadísticas oficiales, por lo que representan la situación media italiana. No se incluyen labores de reforma, y el mantenimiento queda contabilizado en la fase previa al uso.
- Para la fase de fin de vida se tuvieron en cuenta las labores previas a la voladura, la demolición, separación de residuos “in situ”, transporte a plantas de reciclaje o de vertedero según corresponda, y los procesos de reciclaje.

Resulta interesante ver que, en el planteamiento de Blengini, tras hacer la estimación estadística del consumo de energía durante la fase de uso se asigna un 67% del mismo a la calefacción, asociando consumo de diesel durante los primeros 10 años y cambiando a gas natural para los siguientes 30. La energía para suministro de agua sanitaria se estima en un 12%, un 6% para la cocina (ambos asociados a gas natural), y un 14% para la iluminación, que se contabiliza como electricidad según el mix energético nacional. Al siguiente año, este mismo autor presenta [53] junto con Di Carlo un caso de estudio en el que se

analiza una vivienda de bajo consumo energético. En este trabajo utilizan el mismo modelo, contabilizando el mantenimiento junto con la construcción del edificio.

2.2.2. Huella Ecológica aplicada a la edificación

A continuación se presentan los principales estudios publicados hasta la fecha que definen una metodología y aplican el indicador HE al sector de la edificación.

En 2007, Bastianoni *et al.* [54] desarrollan un modelo de cálculo de la Huella Ecológica del proceso edificatorio, en el que tienen en cuenta la energía incorporada de los materiales de la construcción, y la utilizada en el proceso de construcción. Esta energía es posteriormente transformada en emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), asociadas tradicionalmente a superficie de bosques para su absorción. Según los autores, entre un 30 y un 40 % de la energía total consumida en los países desarrollados está asociada o es una consecuencia de la edificación, y alrededor de la mitad de este porcentaje se utiliza para climatizar los edificios.

Algunas de las hipótesis utilizadas en este estudio son la inclusión de la vida útil de los materiales en el cálculo de su energía incorporada, de manera que se obtiene la energía incorporada por año; la utilización de un coeficiente de un 5 % del total de energía incorporada del material como aproximación a la energía necesaria para su puesta en obra [55] (por ejemplo, energía necesaria para pequeña y gran maquinaria en la obra); o la asignación de un factor de emisión nulo para los productos naturales como la madera o el corcho. Por otro lado, el modelo también sufre de algunas carencias, ya que asigna todo su impacto directa o indirectamente al terreno de bosques y al área ocupada directamente por el edificio, sin tener en cuenta otros elementos como el consumo de agua en la obra (el cual hay que decir que normalmente no está incluido en los cálculos de Huella Ecológica), la generación de residuos, o el trabajo de los operarios, obteniendo así un resultado que fácilmente se podría asimilar a la Huella de Carbono en lugar de utilizar este indicador.

Bin y Parker [56] estudian de la variación del impacto ambiental provocada por las reformas que afectan a la eficiencia energética (aislamiento, contención del aire y uso de energías renovables) utilizando el indicador Huella Ecológica.

Solís *et al.* [57] desarrollan un modelo de cálculo de Huella Ecológica para la fase de construcción de edificios residenciales, en el que se introducen por primera vez en estos planteamientos el consumo de agua en la obra, la movilidad de los operarios y la alimentación de los mismos, que queda asimilada al consumo de energía durante el trabajo en la obra. Además, también se incluyen los consumos derivados de los costes indirectos y de los conceptos de seguridad y salud en obra. Este modelo considera todos los aspectos del proceso edificatorio con un alto grado de detalle, y muchos de sus planteamientos se tendrán en cuenta en esta tesis.

Teng y Wu [58] analizan el ciclo de vida completo de un salón de exposiciones en Wuhan, China. En la fase de operación incluyen el consumo de energía y

agua durante la vida útil estimada para el edificio. Este modelo termina siendo algo superficial en su afán por abarcar todo el ciclo de vida, y con ello se cometen errores como el de asignar el impacto del consumo de agua a la superficie productiva de zonas pesqueras interiores y marinas.

Por último, en 2015 González Vallejo *et al.* [59,60] aplican el modelo de Solís *et al.* antes mencionado a un conjunto de alrededor de 100 edificios representativo del sector residencial en España, clasificando los casos según tipología y divididos en las diferentes fases del proceso constructivo, de modo que consiguen obtener resultados extrapolables que servirán para estimar la HE de edificios similares construidos en el país.

Capítulo 3

Justificación y objetivos

La motivación para este trabajo viene marcada por diversas circunstancias que se dan tanto en el sector de la edificación como en la investigación del impacto ambiental que éste provoca sobre el medio ambiente.

El impacto sobre el medio ambiente de la actividad constructora se ha visto acrecentado en los últimos años en España debido a la febril actividad del sector, que desencadenó la llamada “burbuja inmobiliaria”. La construcción y el uso de los edificios en España suponen actualmente más del 30 % del consumo de energía y generación de emisiones de CO₂, más del 20 % de las extracciones de materiales de la corteza terrestre y entre el 30 y el 40 % de los residuos sólidos generados.

La situación actual de crisis y paralización en el sector ofrece una oportunidad a los agentes que intervienen en la edificación para hacer un autoanálisis en busca de posibles mejoras en cuanto a la rentabilidad y sostenibilidad de sus procesos de producción. Hoy en día la mayor prioridad no es la construcción de nuevos edificios, sino el mantenimiento y renovación del parque inmobiliario existente.

Por otra parte, son varios los estudios que siguen unos patrones similares para el cálculo del impacto ambiental de la edificación, pero los puntos en común que obtienen como resultado se pueden resumir en estas tres conclusiones:

- La fase de construcción del edificio es la que produce un consumo más intensivo, concentrado en un corto periodo de tiempo (1-2 años). Las decisiones tomadas durante esta etapa influirán en gran medida en el resto de fases del ciclo de vida del edificio.
- La fase de ocupación es la que mayor consumo de energía tiene en todo el ciclo de vida del edificio. Su duración, más de 50 años, hace que reducir el consumo de energía operacional sea la principal meta a alcanzar.
- La reducción del consumo de energía durante la fase de uso se debe alcanzar a través de decisiones en la fase de diseño, que normalmente implican

una mayor energía embebida de los materiales de construcción. Por tanto, una vez que la energía operacional se reduzca, la atención de los investigadores deberá centrarse en el desarrollo de nuevos materiales de aislamiento que requieran poca energía para su fabricación.

Con estos datos en la mano, no se puede ignorar la importancia de anticipar los impactos que se van a producir como consecuencia del diseño del edificio. En este campo existen numerosos análisis de impacto ambiental de edificios, aunque sólo unos pocos abarcan el ciclo de vida completo y la gran mayoría se limitan al análisis del consumo energético.

El tercer motivo se debe a las investigaciones previas desarrolladas por el grupo ArDiTec (TEP-172) de la Universidad de Sevilla, en el que se integra el autor. La línea de investigación abierta sobre la adaptación del indicador Huella Ecológica para el cálculo del impacto de la construcción de edificios requiere dar un paso más y estudiar otras etapas del ciclo de vida del edificio. Dadas las conclusiones anteriores, parece lógico centrarse en aquella etapa que se considera que provoca un mayor impacto ambiental.

El objetivo principal del presente trabajo de investigación consiste en diseñar un método de cálculo de los costes económicos y el impacto ambiental de los edificios durante la fase de uso y mantenimiento, tomando como base el proyecto de ejecución. Para llegar a alcanzar dicha meta es necesario llevar a cabo algunos pasos previos, que se traducen en los siguientes objetivos específicos:

1. Establecer límites del sistema que permitan evitar solapes entre distintos edificios o sectores.
2. Fijar la estructura o clasificación sistemática para una base de costes de mantenimiento y limpieza de edificios.
3. Definir una metodología para la medición, especificando qué medir y cómo hacerlo.
4. Desarrollar un método para cuantificar los recursos consumidos y residuos generados durante la fase de uso y mantenimiento de los edificios.
5. Diseñar un modelo de cálculo del impacto ambiental provocado por los consumos y residuos antes mencionados.
6. Probar la utilidad del modelo de cálculo mediante su aplicación a un edificio real, así como su sensibilidad a cambios en los valores utilizados.

Capítulo 4

Metodología

Para la consecución del objetivo principal de esta investigación se seguirán los pasos marcados por los objetivos específicos, que se traducen en la siguiente metodología de trabajo (Figura 4.1).

Tras unas definiciones de conceptos básicos para entender la mecánica del indicador HE, el primer punto a desarrollar consiste en la fijación de los límites del sistema o ámbito del estudio. La definición de los límites requiere discernir qué acciones o elementos forman parte de la etapa de uso y mantenimiento de los edificios. Es necesario definir, por un lado, límites longitudinales que establezcan los instantes de comienzo y fin de esta fase del ciclo del vida del edificio, y por otro, límites transversales que aislen aquellas actividades estrechamente relacionadas con el edificio de las que se consideran independientes del mismo. Por tanto, la fijación de los límites del sistema deberá evitar dobles contabilidades y solapes con otras etapas del ciclo de vida del edificio y con las HE de otros edificios.

Una vez determinados los límites del sistema, vemos que los focos de impacto que serán objeto de estudio se pueden englobar en dos ramas distintas: uso, y mantenimiento/limpieza. En la primera rama los datos proceden de información de carácter general de que disponemos sobre el edificio o proyecto. En ella quedan englobados los consumos de suministros y superficie ocupada, que se conocen por facturas (edificio existente) o se estiman por simulaciones (proyecto). En la segunda, los datos deben obtenerse a través de la medición del proyecto o edificio, pero actualmente no contamos con un método para hacer una medición de mantenimiento y limpieza de edificios.

El siguiente paso, por tanto, consiste en dar solución a este problema, fijando una estructura o clasificación sistemática para las labores de mantenimiento y limpieza, que permita su integración y conexión con una medición clásica de proyecto de ejecución. Esta estructura se basará en la codificación de la Base de Costes de la Construcción de Andalucía (BCCA), por considerarse de una solidez demostrada y adecuada para el fin que aquí se propone, aunque esta decisión se justificará más adelante. Los precios unitarios desarrollados siguiendo

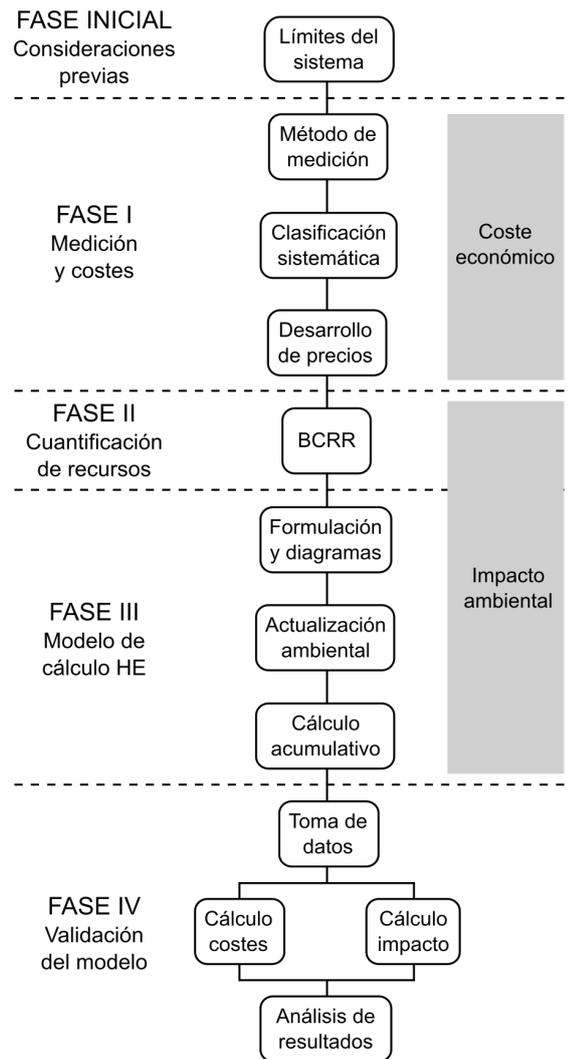


Figura 4.1: Metodología general de la investigación.

dicha clasificación sistemática, junto con los datos de consumo de suministros, permitirán estimar el coste económico total de la fase de uso y mantenimiento de los edificios.

A continuación, para afrontar el cálculo del impacto ambiental del edificio se deben determinar los recursos consumidos y residuos generados durante esta fase del ciclo de vida. Para que esto sea posible es necesario diseñar lo que llamaremos Banco de Cuantificación de Recursos (BCRR), en el que cada tarea a realizar estará desglosada en las cantidades de materiales, mano de obra y maquinaria que requiere. Este desglose es posible gracias a que el BCRR se adapta a la BCCA, en la que los precios unitarios correspondientes a las distintas tareas están desglosados en estos tres elementos básicos. El BCRR contemplará tanto las actuaciones de reforma o mantenimiento de los elementos constructivos como las labores de limpieza, consideradas aquí parte esencial para el correcto mantenimiento del edificio.

Para cerrar la parte teórica del trabajo, se pasará a desarrollar el modelo de cálculo de HE aplicado a la fase de uso y mantenimiento de los edificios. En este modelo quedarán plasmados los aspectos generales establecidos hasta el momento: los impactos, su clasificación según el origen causante, la procedencia de los datos auxiliares necesarios, y el proceso de transformación a las distintas categorías de HE. Para ello se diseñará la formulación necesaria y diagramas de flujo que ilustren los pasos a seguir, además de especificar las fuentes a utilizar para la obtención de los datos auxiliares requeridos.

Dada la larga duración de la fase a tratar, tanto el coste económico como el impacto ambiental deberán incluir tasas de actualización a términos del año actual, ya que, al igual que ocurre con el valor del dinero, la capacidad del planeta para producir los distintos recursos varía a lo largo del tiempo. Además conviene poder localizar en el tiempo las tareas, de modo que sea posible identificar en qué periodos de tiempo concretos se produce una acumulación de costes o impactos.

Tras finalizar el diseño del modelo, éste será validado mediante su aplicación a un edificio real. Como edificio objeto de estudio ha sido seleccionado el Colegio Mayor Hernando Colón, situado en Sevilla. La elección se debe a diversos motivos: la posibilidad de acceso a datos del edificio en cuanto a geometría y gestión del mismo, la cercanía al lugar de trabajo, el interés del edificio debido a la gran variedad de instalaciones y usos presentes en él, y sus dimensiones, considerables pero abarcables dentro de este estudio.

El estudio de caso se estructurará en cinco pasos. En primer lugar se presenta una descripción técnica del edificio, mostrando su geometría, características constructivas, elementos que lo conforman, usos de los espacios, instalaciones, peculiaridades, etc. A continuación se lleva a cabo la obtención de datos generales, referentes a consumos de suministros, y su estimación o extrapolación para el total de la vida útil del edificio. Estos datos conforman la base para el cálculo de la HE correspondiente a la rama de uso. El tercer paso consistirá en abordar la parte relativa a la rama de mantenimiento y limpieza, realizando las mediciones del edificio a fin de cuantificar los recursos necesarios mediante el BCRR. Por último, se transformarán todos estos consumos de recursos y la generación

de emisiones a términos de HE por medio de la formulación establecida en el modelo, obteniendo los resultados finales para el caso estudiado, que finalmente serán discutidos.

Capítulo 5

Modelo teórico

Como se ha propuesto en los objetivos, en esta tesis se diseñará un modelo teórico para el cálculo de costes económicos e impacto ambiental del uso y mantenimiento de edificios. La alta complejidad del conjunto de actividades que se llevan a cabo durante esta fase de su ciclo de vida, junto con una percepción general de que el mantenimiento y la limpieza resultan poco significativas desde el punto de vista medioambiental con respecto al consumo de suministros, han hecho que la estimación de estos valores haya sido evitada en casi todos los estudios, como ya se pudo ver en la Sección 2.2.

El modelo de estimación de costes e impacto que aquí se desarrolla consiste en un análisis pormenorizado de todos los consumos y tareas que se consideran directamente relacionados con el edificio en sí, y que se producen durante la fase del ciclo de vida a tratar. El desglose de los costes en concepto de materiales, mano de obra y maquinaria como elementos básicos para la cuantificación de recursos consumidos consigue además proporcionar transparencia a un sector empresarial que generalmente, ya sea por desconocimiento o desinterés, no se analiza en profundidad. La realidad es que el mantenimiento y la limpieza de edificios suponen un gasto considerable al que habitualmente no se le exige el mismo grado de detalle en los presupuestos que a las obras de construcción. Sin embargo, si se le pregunta a cualquier Facility Manager (FM) o gestor de edificios terciarios, dirá que es de vital importancia en su trabajo conocer estos datos.

Con el desarrollo de una estructura sólida y costes desglosados para tareas de mantenimiento y limpieza se pretende llenar el vacío actual en cuanto a la estimación de los mismos desde la fase de diseño de los edificios, lo que a su vez supondrá un considerable avance en el estudio de los Costes de Ciclo de Vida o Life-Cycle Costing (LCC). La aportación de una base de precios inicial y de una metodología para crear nuevos precios que la completen, hará posible en un futuro conocer cuánto va a costar un edificio año a año durante su vida útil, sin siquiera haberlo construido, siendo así capaces de estudiar posibles mejoras en el diseño que provoquen un descenso de los costes futuros. Paralelamente, con el modelo que aquí se propone, este análisis se puede extender al marco de la

sostenibilidad en la edificación.

5.1. Conceptos básicos de la Huella Ecológica

Para entender la metodología del indicador HE es necesario definir algunos conceptos a los que se alude constantemente a lo largo de modelo: las áreas productivas, los factores de productividad, los de equivalencia, la biocapacidad y el déficit ecológico. Hay que tener presente que la metodología, y por tanto todos estos conceptos, fueron definidos para su aplicación a una sociedad, porque lo que deberán ser adaptados al estudio de un edificio.

A modo de resumen, diremos que para trasladar los consumos que se producen en el edificio a un resultado en términos de HE es necesario utilizar algunos factores de conversión. Este proceso de conversión se da en dos pasos. En el primer paso se obtienen las hectáreas de terreno productivo necesarias para producir un determinado recurso o absorber un residuo, utilizando para ello los factores de productividad (o absorción). El segundo paso consiste en transformar esas hectáreas de terreno productivo en hectáreas globales mediante los llamados factores de equivalencia. Las hectáreas globales (hag) son una unidad de medida estandarizada comparable entre los distintos países [61], que además permite que los resultados para las distintas categorías de HE se puedan sumar entre sí, obteniendo así un resultado final único de impacto ambiental.

La HE no sólo consiste en averiguar cuál es el impacto ambiental de la sociedad, sino también en compararlo con la capacidad que tiene el planeta para producir los recursos que la sociedad consume, más conocida como capacidad de carga o biocapacidad. Si esta capacidad de regeneración se supera, se produce un déficit ecológico que afecta a las futuras generaciones.

A continuación se definen de manera más extensa estos elementos que sentarán las bases del modelo a desarrollar.

5.1.1. Área productiva

Un área productiva es una superficie de terreno dedicada a producir los recursos que la sociedad consume. El indicador HE utiliza 6 tipos de área productiva: cultivos, pastos, bosques, zonas pesqueras, terreno de absorción de carbono, y suelo urbanizado, cada uno dedicado a producir ciertos recursos.

Desde la aparición del indicador en 1996 [25] ha habido sugerencias de grandes cambios en cuanto a los terrenos de pesca, cultivos y área construida, e incluso algunos autores han sugerido que se deberían añadir nuevos tipos de terreno productivo [62]. Otros autores proponen modificar este modelo con nuevos sistemas de ponderación que reflejen el grado de alteración del terreno, incluso considerando toda la superficie del planeta [63], pero de momento el modelo permanece sin demasiados cambios. Por ello pensamos que es mejor no utilizar dichas propuestas en este estudio, a fin de obtener un modelo de cálculo coherente con la metodología más generalizada, la utilizada por la Global Footprint Network [64]. Así pues, las áreas productivas se definen en el Informe Planeta Vivo de 2012 [65] como se muestra en la Figura 5.1.



Figura 5.1: Tipos de área productiva en la Huella Ecológica. Fuente: WWF (2012).

Estos 6 tipos de área productiva abarcan la producción de la mayoría de los recursos consumidos por la sociedad actual. La HE, como se mencionó antes, se calcula normalmente para sociedades o personas individuales. En la huella de una persona o sociedad están incluidos los impactos causados por el uso y mantenimiento de edificios, además de su construcción y demolición. En este estudio se aísla la HE del uso y mantenimiento del resto de la HE de las personas, y se define un modelo de cálculo capaz de cuantificarla con alta precisión y transparencia gracias a un profundo conocimiento del sector de la edificación.

5.1.2. Productividad y factores de productividad

Cada tipo de terreno lleva asociada una productividad que indica qué cantidad de recursos es capaz de producir por unidad de área. Así, cuando conocemos la cantidad de recursos consumidos, podemos averiguar qué superficie del terreno productivo correspondiente se necesita para producirlos. Las productividades pueden ser de carácter global, nacional, o incluso regional. En principio, cuanto más estrecho sea el cerco, más ajustado a la realidad estará el resultado.

Como se puede comprobar en la Figura 5.2, la productividad interviene de distinta manera en dos cálculos separados. Por un lado, el consumo de cada tipo de recurso se divide entre la productividad media mundial de ese recurso, obteniendo el área mundial de un tipo de terreno productivo necesaria para producir la cantidad consumida. Este área viene expresada en hectáreas con productividad media mundial (ham). Por otro lado, al dividir la productividad media nacional (o regional) entre la productividad media mundial de un tipo de recurso, obtenemos el factor de productividad para ese recurso, que no es más que un coeficiente de paso que convierte las hectáreas nacionales en hectáreas mundiales (ham han⁻¹). Los factores de productividad (en adelante FP) se utilizan en el cálculo de la biocapacidad para convertir las hectáreas disponibles en una región a hectáreas con productividad media mundial.

En una crítica al diseño inicial de la HE, van den Bergh y Verbruggen opinan [66] que estos factores no son correctos, ya que no reflejan cambios en la productividad con el paso del tiempo ni variaciones en el espacio, esto último cuando se trata de factores globales. Además critican la asociación de una única función para cada tipo de suelo, remarcando que la metodología de la HE asume que la superficie de bosques se dedica bien a la producción de madera, o bien a la absorción de CO₂, pero nunca a ambas al mismo tiempo. Kitzes *et al.* [62] subrayan la existencia de estos problemas, y consideran que el método de cálculo debería permitir utilizar valores de productividad constantes o variables anualmente. Otros autores [63] han intentado elaborar nuevos FP que describan la degradación de los ecosistemas regionales, más que la apropiación de terreno. Finalmente, la última actualización de la metodología [64] define los FP como específicos para cada nación, variables anualmente, y distintos para cada tipo de terreno productivo.

Para este estudio en concreto, la variación de las productividades a lo largo del tiempo se aplica conforme a análisis de escenarios llevados a cabo por la GFN, mientras que los consumos de recursos se obtienen extrapolando los valores

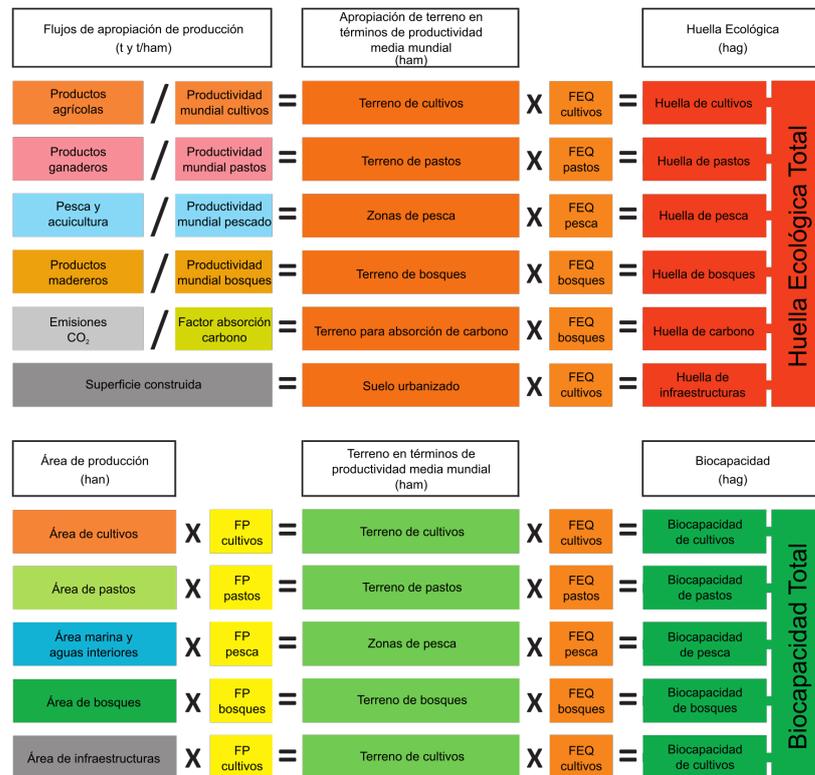


Figura 5.2: Aplicación de los factores de productividad y equivalencia. Fuente: Borucke *et al.* (2013).

obtenidos para un conjunto de años al total de la vida útil del edificio. Con ello se asume la hipótesis de que los consumos serán constantes en un periodo de al menos 50 años. Sería interesante, con el paso de los años y una recopilación de datos periódica, observar las variaciones en los consumos del edificio en distintos periodos de tiempo, como indican en sus estudios algunos autores [67–70].

Según Borucke *et al.* [64], el cálculo de las productividades cuenta con algunas peculiaridades según el terreno productivo del que se trate. A continuación se explica la forma de obtener los datos y cuáles son estas características especiales:

- **Carbono:** se utiliza la tasa de absorción de CO₂ por parte de los terrenos de bosque como productividad de este tipo de área, basada en datos del Intergovernmental Panel on Climate Change [71]. Antes de convertir las emisiones en área productiva mundial, se hace un ajuste por la tasa de absorción de CO₂ en los océanos, obtenida a partir de los datos sobre emisiones antropógenas, de Marland *et al.* [72], y del estudio de Khatiwala *et al.* sobre la cantidad de dióxido de carbono absorbida por los océanos [73]. En cuanto al cálculo de la biocapacidad, este tipo de terreno queda incluido en la superficie de bosques, y se utiliza su FP, ya que no se tienen datos sólidos sobre la capacidad de absorción de CO₂ de otros tipos de terreno.
- **Cultivos:** este tipo de terreno tiene la mayor productividad de todas. Los datos de productividad mundial (t ham⁻¹) de los distintos tipos de cultivos se obtienen de la Organización de Alimentos y Agricultura (FAO) de las Naciones Unidas [74]. Respecto al FP, resultado de dividir la productividad nacional entre la mundial para cada producto, Haberl comenta [75] que en los cálculos se obvia el hecho de que la agricultura intensiva causa otros impactos que se podrían considerar no sostenibles, como el agotamiento de nutrientes, la contaminación de aguas subterráneas y otros recursos, y la erosión del suelo.
- **Pastos:** también calculado por medio de los datos estadísticos de la FAO, incluye todos los pastos utilizados para proporcionar alimento a los animales, tanto los pastos cultivados como los naturales y las praderas. Este cálculo es uno de los más complicados, y ha sufrido grandes mejoras en los últimos años [76].
- **Bosques:** se utiliza el incremento neto anual de madera comerciable por hectárea. La productividad media anual se calcula según datos de la FAO y UNECE [77], y se establece conforme a datos de 13 productos primarios de madera y 3 dedicados a combustión. Esta productividad viene expresada, dependiendo del producto, en m³ ham⁻¹ o t ham⁻¹. El FP se calcula de forma similar al de cultivos.
- **Pesca:** se subdivide en zonas pesqueras marinas y zonas pesqueras interiores. La productividad mundial depende de la especie de pescado, y se basa en estimaciones de la captura anual sostenible de 19 grupos diferentes de especies acuáticas [78] y en la formulación desarrollada por Pauly y Christensen [79]. Para las zonas interiores se asigna un FP de 1 debido a que se

desconoce su productividad real. Sin embargo, estas estimaciones tienen sus limitaciones y errores, y actualmente se está planteando mejorarlas utilizando información sobre la calidad del stock de las distintas especies, o al menos de las más significativas [76]. Incluso si no se consiguiera, se considera que un modelo simplificado podría mejorar los métodos actuales.

- Suelo urbanizado: en este caso estamos midiendo directamente el área ocupada por las infraestructuras o edificios, que ya viene expresada en hectáreas, y por tanto no es necesario dividir entre una productividad para obtener las hectáreas mundiales equivalentes. En cuanto al cálculo de la biocapacidad, se toma como hipótesis que el terreno construido ocupa tradicionalmente territorios apropiados para el cultivo [25], por lo que el FP utilizado es el correspondiente a terrenos de cultivo. Se sabe que dicha hipótesis no es siempre cierta, ya que en países tropicales las ciudades suelen ocupar territorios de bosques, y en Asia central y medio oriente ocupan zonas áridas [80]. Sin embargo son pocos los asentamientos humanos situados en entornos improductivos. Sólo las sociedades industriales basadas en la riqueza petrolífera se pueden permitir mantener grandes asentamientos en ecosistemas con baja productividad [81]. De este modo, asumiremos que el suelo urbanizado está asentado sobre terrenos de cultivo, salvo en aquellos casos en los que se tenga certeza de que el terreno preexistente era de otro tipo. Por otro lado, hay un debate abierto sobre si el suelo urbanizado debería ser eliminado de las cuentas de la Huella Ecológica, pues se considera que no será biológicamente productivo nunca, o si por el contrario debe permanecer como un terreno productivo disponible pero ocupado [62].

5.1.3. Factores de equivalencia

Una vez que tenemos las áreas consumidas y disponibles para cada tipo de terreno, es necesario convertirlas todas a una unidad que permita sumarlas entre sí para obtener un resultado unificado. Para ello se utilizan los factores de equivalencia (en adelante FEQ), encargados de ponderar distintos tipos de áreas en función de su capacidad de producir recursos biológicos útiles para la humanidad, convirtiendo las hectáreas con productividad media mundial (ham) a las denominadas hectáreas globales (hag).

La agregación de resultados en un único valor permite combinar las demandas generadas por la actividad humana (Huella Ecológica) y compararlas con la capacidad regenerativa del planeta (biocapacidad), como se pudo ver en la Figura 5.2. Esto es una característica única de la HE, ya que en otros indicadores las diferentes presiones ambientales se suelen evaluar por separado (cambio climático, degradación del terreno, consumo de alimentos, etc.) [64] y no tienen un límite establecido.

El criterio de ponderación que se sigue no es la cantidad de recursos que produce realmente, sino lo que sería capaz de producir [82]. Los FEQ se calculan utilizando índices de idoneidad del modelo de la GAEZ (Global Agro-Ecological Zones) combinado con datos sobre las áreas reales de cultivos, bosques y pastos,

procedentes de FAOSTAT [74]. Con la metodología actual, solamente es necesario calcular cuatro FEQ: cultivos, pastos, bosques y pesca (Tabla 5.1). Al suelo urbanizado se le asigna el FEQ de cultivos, excepto cuando es evidente que la ciudad no está asentada sobre ese tipo de suelo. A los terrenos para absorción de carbono se les aplica el FEQ de los bosques. Para las zonas inundadas por centrales hidroeléctricas se utiliza un FEQ igual a 1, asumiendo que inundan zonas de productividad media mundial. El FEQ de las zonas marinas de pesca se calcula bajo la hipótesis de que, de cara a la capacidad de alimentar a las personas, la cantidad de calorías de salmón que puede producir una hectárea marina será igual a la cantidad de calorías de res que puede producir una hectárea de pastos. Por último, a las zonas de pesca interiores se les asigna el mismo FEQ que a las marinas [64]. De este modo, los valores de los distintos FEQ quedan como vemos en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Factores de equivalencia según las National Footprint Accounts 2008. Fuente: Global Footprint Network (2010).

Tipo de terreno	FEQ (hag ham ⁻¹)
Cultivos	2.51
Pastos	0.46
Bosques	1.26
Pesca marina	0.37
Carbono	1.26
Hidroeléctricas	1.00
Pesca interior	0.37
Suelo Urbanizado	2.51

Este sistema de ponderación ha sido criticado por van den Bergh y Verbruggen, que no consideraban apropiado que distintas categorías de terreno recibieran el mismo peso [66]. Más aún cuando esto se debe a que una de las principales hipótesis de la HE es que un terreno solamente puede servir para un propósito, de manera que si un bosque produce madera, no puede servir también para absorber carbono o para cualquier otra utilidad [25].

La propuesta alternativa que ha tenido una mayor acogida, aunque la GFN no la aplica por el momento, consiste en utilizar la Productividad Primaria Neta (NPP) como base para el cálculo de los FEQ, convirtiéndolos en datos variables de año en año y estacionalmente [83]. En algunas estaciones y biomas¹ la NPP podría ser incluso negativa, indicando que la respiración de las plantas es mayor que la absorción de carbono, como durante los meses en los que la vegetación está en condiciones de estrés por sequía o bajas temperaturas [62].

5.1.4. Biocapacidad y déficit ecológico

La biocapacidad del planeta se define de manera inversa a la HE, representando así la capacidad que éste tiene de producir los recursos consumidos y absorber las emisiones y residuos generados por la sociedad [25]. Al comparar

¹Zonas que comparten un mismo clima, flora y fauna

la HE con la biocapacidad disponible, se comprueba si estamos viviendo por encima de nuestras posibilidades, medioambientalmente hablando.

Actualmente la GFN estima la biocapacidad total del planeta en aproximadamente 12000 millones de hectáreas [64]. El número de hectáreas globales de biocapacidad es siempre igual al número de hectáreas productivas del planeta, y por tanto es insensible a cambios en la productividad de dichos terrenos [69]. Esta biocapacidad se ha reducido de 3.2 hectáreas globales (hag) por persona en 1961 a 1.78 hag per cápita en 2008 debido al crecimiento de la población mundial, aun cuando la biocapacidad total del planeta se ha incrementado durante este periodo de tiempo [65]. En España tenemos 1.61 hag de biocapacidad por persona, y provocamos una HE de 5.41 hag por persona, distribuidas tal y como vemos en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Huella Ecológica y biocapacidad per capita en España en 2007. Fuente: Global Footprint Network (2010).

Tipo de terreno	Huella Ecológica (hag cap ⁻¹)	Biocapacidad (hag cap ⁻¹)
Cultivos	1.45	1.12
Pastos	0.27	0.12
Bosque	0.49	0.25
Pesca	0.41	0.06
Carbono	2.73	n/a
Suelo Urbanizado	0.07	0.07
Total	5.42	1.61

Esta distribución también ha recibido diversas críticas [66, 83] que aluden a la exclusión de 36000 millones de hectáreas de tierra firme por considerarse poco productivas, así como las zonas lejanas de los océanos; o a la utilización de los terrenos productivos para un único fin, sin tener en cuenta que todos los tipos de terreno absorben CO₂ en mayor o menor medida, además de realizar su función correspondiente.

En el caso que nos ocupa se calculará la HE del uso y mantenimiento del edificio y se dividirá entre el número de ocupantes, de modo que se pueda comprobar qué porcentaje supone este concepto del total de HE y biocapacidad por persona. Es preciso recordar que la HE del uso y mantenimiento del edificio forma parte de la HE de la nación o de las personas. Por tanto, este estudio no es sino una mejora en la precisión de los cálculos referentes a esta etapa del edificio, y no debe producirse duplicidad en cuanto a su cómputo en huellas de ámbito más general.

Cuando la HE supera a la biocapacidad disponible se produce un déficit ecológico. Así, según la Tabla 5.2, en España hubo un déficit de 3.81 hag por persona en 2007, lo que significa que se necesitarían 3.36 “Españas” para producir lo que consumimos en el caso de que no se pudieran importar bienes. Vemos que la naturaleza hipotética de la HE da a entender que se puede exceder la cantidad total de terreno productivo disponible en el mundo, ya que no tiene un límite superior establecido [66]. Incluso parece sugerir que aumentando la productividad de los distintos tipos de terreno se puede reducir el déficit

ecológico [84], sin tener en cuenta que la intensificación de la producción puede conducir a una disminución de la biodiversidad en lugar de a su conservación. Para ello se han propuesto algunos métodos para un cálculo de la HE basados en la perturbación de los terrenos, ya que el aumento de la perturbación y la pérdida de biodiversidad podrían estar estrechamente relacionadas [63].

Hay que puntualizar entonces que, en la metodología general de la HE, la biocapacidad está sobreestimada, ya que no se tiene en cuenta la degradación de los terrenos y por tanto la disminución de su productividad, mientras que la HE está infraestimada [64], pues no están incluidos el consumo de agua, la erosión del suelo, los GEI distintos del CO₂, ni otros impactos como la contaminación por los residuos generados, la toxicidad, eutrofización, etc.

Como se puede ver en la Figura 5.3, según la última actualización de los datos en 2008, el déficit ecológico actual en términos de HE es de más de un 50 %. La barrera de la biocapacidad del planeta se superó alrededor de 1970. En concreto, en 2008, la biocapacidad era de 1.78 hag per cápita mientras que la HE era de 2.7 hag por persona, lo cual significa que el planeta necesitaría un año y medio para regenerar los recursos que la humanidad utilizó en un año. También se han llevado a cabo estudios predictivos que estiman que en un escenario en el que se continúa con las tendencias de consumo y producción de la actualidad, el déficit ecológico de la humanidad en 2050 sería de 2.9 planetas [65].

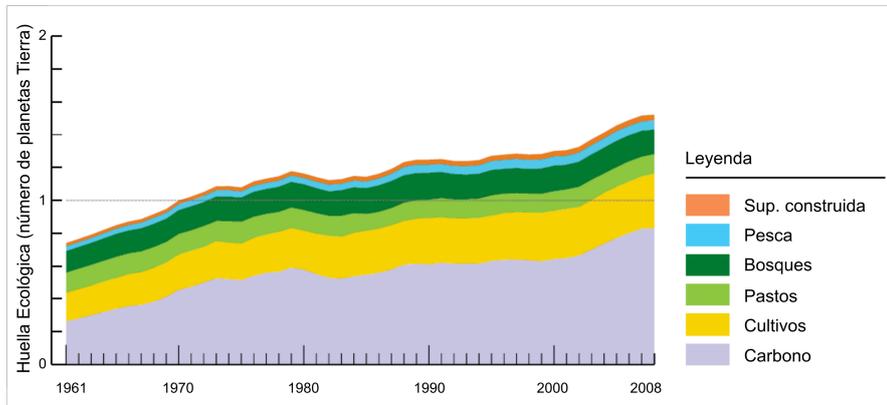


Figura 5.3: Huella Ecológica global por componentes. Fuente: Global Footprint Network (2011).

Se ha estudiado la posibilidad de aplicar los conceptos de biocapacidad y déficit ecológico en este trabajo mediante el cálculo de la porción de biocapacidad que correspondería o que estaría disponible para “gastar” en el uso y mantenimiento del edificio. Tras barajar algunos planteamientos, se llega a la conclusión de que no es posible hacer esta asignación de biocapacidad, pues de hacerlo estaríamos diciendo cómo de sostenible debería ser esta etapa del ciclo de vida del edificio frente a otras actividades de la sociedad, y esto no es cuantificable.

5.2. Límites del sistema

Según la definición del indicador HE de Wackernagel y Rees, un requisito indispensable del cálculo es que la huella de una población no debe afectar a otras poblaciones, al igual que la huella del mercado de un país no se solapa con los mercados de otros países [25]. Por tanto, la primera condición para fijar los límites del sistema viene preestablecida, y consiste en que la HE de un edificio no puede solaparse con la de otros edificios, de modo que no exista doble contabilidad en ese aspecto. Además, el problema de doble contabilidad se complica si nos planteamos la asignación de la responsabilidad por los impactos ambientales, es decir, si el responsable por los impactos debe ser el productor, que se lucra de la fabricación del producto, el consumidor, que se beneficia de su uso, o si ambos deberían compartir dicha responsabilidad.

En este apartado, los límites del estudio de la HE del uso y mantenimiento de edificios se analizarán desde tres puntos de vista: el longitudinal, que definirá el comienzo y el fin de esta etapa del ciclo de vida de un edificio (CVE); el transversal, que establecerá las fronteras entre los elementos que forman parte del edificio y los que corresponden a las personas o a otros sectores de la producción; y por último un punto de vista ético, en el que se discute quién debería asumir la responsabilidad ambiental por los impactos generados. Los dos primeros se abordan de forma conjunta, mientras que éste último se analiza por separado debido a que requiere un enfoque distinto.

5.2.1. Fronteras longitudinales y trasversales

En sentido longitudinal, el momento de inicio de la fase de uso y mantenimiento está claro. Tras la finalización de la obra de construcción y la entrega del edificio, éste ya está listo para ser ocupado, dando comienzo así la etapa de mayor duración de su ciclo de vida, que en principio se suele estimar entre 40 y 100 años, y que termina cuando acaba la vida útil del edificio.

Definir el momento en el que termina su vida útil no es tan sencillo. Por ejemplo, Adalberth [38] divide el CVE en tres fases, subdivididas a su vez en fabricación de los materiales, su transporte a la obra, la construcción del edificio, la ocupación del mismo con un periodo intermedio dedicado a la renovación, para terminar con la demolición y residuos o reciclaje (Figura 5.4). Esta división por etapas está bastante generalizada, con ligeras variaciones de un estudio a otro, y limita la fase de uso y mantenimiento al consumo de energía y las obras de reforma o renovación.

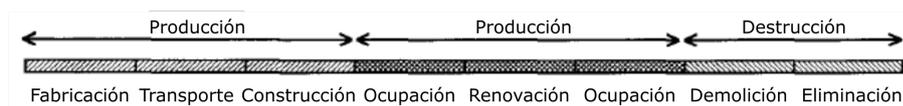


Figura 5.4: Ciclo de vida del edificio según Adalberth. Fuente: Adalberth (1997a).

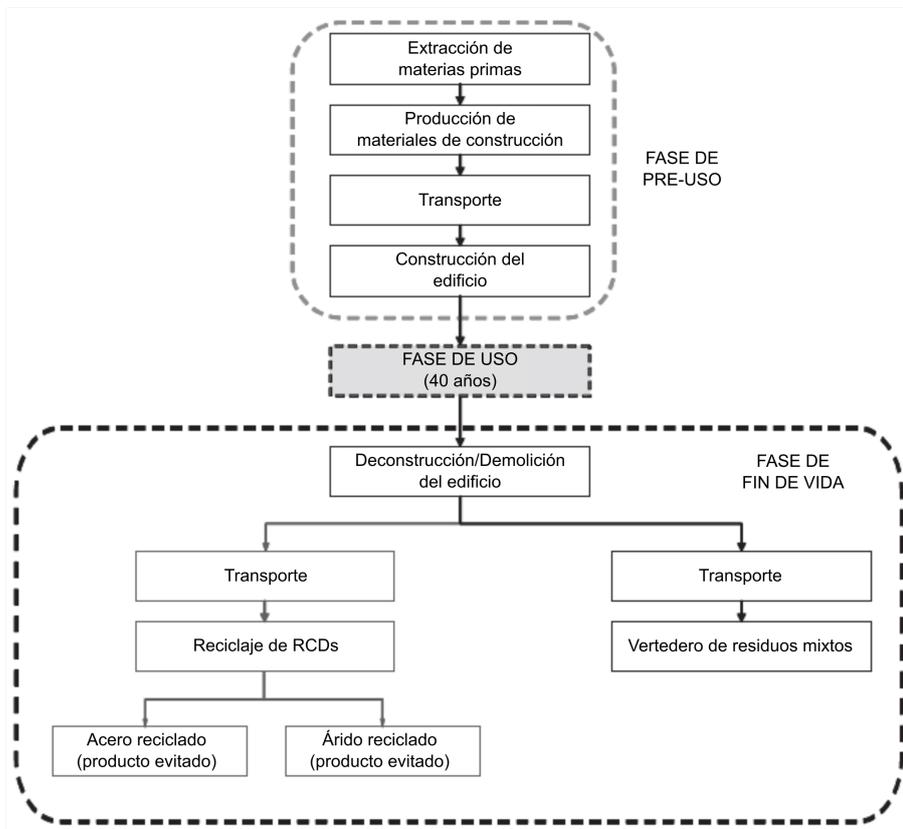


Figura 5.5: Ciclo de vida del edificio según Blengini. Fuente: Blengini (2009).

Blengini [43] establece unos límites del sistema similares a los de Adalberth, sólo que no especifica ninguna labor de mantenimiento del edificio. Se limita a contabilizar los consumos de energía, gas y agua según datos estadísticos de Italia. Además, al tratarse de un modelo centrado en el aprovechamiento de los residuos de demolición, se puede observar un mayor grado de detalle del modelo en esta fase (Figura 5.5).

Por su parte, el CEN/TC 350 “Sostenibilidad de los trabajos de construcción”, que se encuentra actualmente en desarrollo, recomienda la consideración de no tres, sino cuatro etapas en el ciclo de vida de los edificios, separando la construcción de la fabricación de productos [53], de manera que tendríamos:

- Fase de producción: extracción de materias primas, transporte a fábrica, y manufactura.
- Fase de construcción: transporte y procesos de construcción o instalación en obra.
- Fase de uso: mantenimiento, reparación y sustitución de productos, reformas, energía operacional (calefacción, aire acondicionado, ventilación, agua caliente e iluminación), y consumo de agua operacional.
- Fase de fin de vida: deconstrucción, transporte, reciclado o reutilización, y vertido.

Aun así, Blengini y Di Carlo dividen el trabajo en tres fases, al igual que hizo el primero en su anterior trabajo, incluyendo el impacto correspondiente al mantenimiento junto con los procesos de construcción del edificio, lo cual puede ser un planteamiento válido cuando estudiamos el ciclo de vida completo del edificio, pero en nuestro caso estas dos etapas deben estar claramente diferenciadas, y por tanto las labores de mantenimiento deben formar parte de la fase de ocupación del edificio.

Bin y Parker muestran un modelo muy similar [56] pero con ciertas particularidades. En su modelo, el CVE está dividido en tres fases: pre-uso, uso, y post-uso. Por algún extraño motivo, la construcción del edificio ha sido incluida dentro de la fase de uso. Esto podría deberse a que la fase de pre-uso sigue un modelo “cradle-to-site” o “de la cuna al sitio”, lo que quiere decir que contempla todos los procesos desde la extracción de la materia prima hasta que los materiales elaborados se entregan a pie de obra (Figura 5.6), sin embargo este cambio hace que el modelo no sea acorde a la división generalmente utilizada para las etapas del CVE.

En sus modelos, todos estos autores dejan claro que la etapa de ocupación del edificio finaliza con su demolición, pero ¿qué ocurriría si en lugar de ser demolido se decidiera rehabilitarlo? Teniendo claro que en ese instante el edificio ha dejado de ser habitable, nos encontramos ante la decisión de demoler o rehabilitar. En el caso de que escogiéramos la vía de la rehabilitación, ¿sería el edificio resultante el mismo edificio al que se le ha ampliado su vida útil o, por el contrario, se trataría de un nuevo edificio que comienza su ciclo de vida?

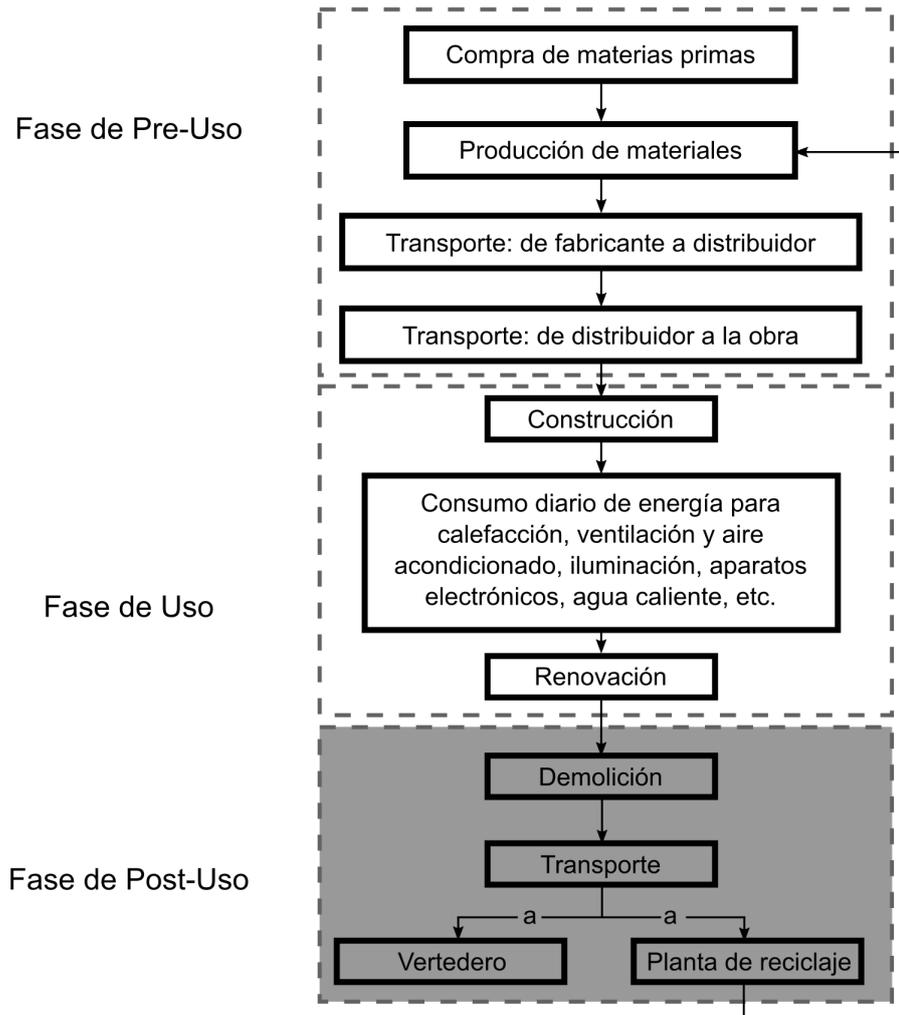


Figura 5.6: Ciclo de vida del edificio según Bin y Parker. Fuente: Bin y Parker (2012).

Como respuesta a estas cuestiones se establece la siguiente hipótesis, en el presente estudio se asumirá que la vida útil del edificio termina en el momento en que éste ya no es habitable. De cara al modelo, la rehabilitación de un edificio da lugar a un edificio nuevo cuyo ciclo de vida comienza, por tanto no se considera una prolongación de su vida útil. Esta decisión se toma porque se considera que un edificio en mal estado que es rehabilitado sufre grandes cambios, tanto en sus soluciones constructivas mediante una posible rehabilitación energética, como en sus instalaciones, demasiado modernizadas con respecto a las originales, con el consiguiente cambio en los patrones de consumo. Incluso podría ocurrir que con la rehabilitación, el edificio cambiara el tipo de uso al que estaba destinado en origen.

Dicho esto, es posible establecer unos límites longitudinales claros, descartando cualquier proceso que corresponda a la construcción del edificio así como cualquiera relativo a la demolición, deconstrucción o rehabilitación del mismo. Por tanto, en adelante se considerará que la fase de uso y mantenimiento del edificio comienza cuando termina su construcción y finaliza en el momento en que deja de ser habitable o sufre una rehabilitación o remodelación tal que su comportamiento no sea al menos similar al que tenía en su estado original.

Para definir los límites trasversales del modelo debemos estudiar primero cuáles son las actividades que se dan durante el uso y mantenimiento de un edificio. Como punto de partida, un estudio pormenorizado de los costes durante las fases de preconstrucción, construcción y postconstrucción, desarrollado por Basabe del Castillo [85] permite extraer la lista de actividades que se presenta en la Tabla 5.3.

Ampliando un poco estos horizontes, en el edificio hay también presencia de mobiliario, electrodomésticos, consumibles, y por último, ocupantes, que se alimentan, se desplazan a y desde el edificio en vehículos, y producen Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Todos estos factores tienen más que ver con la HE de las personas que ocupan el edificio que con el edificio en sí, y por tanto se considera que deben quedar fuera del estudio.

En cuanto a las operaciones recogidas del estudio de Basabe del Castillo, es interesante resaltar el apartado de personal, en el que se contabilizan las horas de trabajo de los operarios, personal de mantenimiento, y de limpieza. La mano de obra es demasiado significativa en la medición de un proyecto para ignorar el impacto que provoca. Por ello, aquí se considerarán dos fuentes de impacto procedentes de la mano de obra: los alimentos y los RSU. Aunque en anteriores modelos de cálculo [57, 59] se tenía también en cuenta la movilidad de los trabajadores, el estándar UNE-EN 15978:2012 [86] establece que, para la fase de construcción, el transporte de los trabajadores hacia y desde el centro de trabajo no debe ser incluido, y por tanto tampoco debe esta movilidad ser incluida en el caso de los trabajadores de cualquier compañía.

De este modo se define claramente una frontera industria-edificio, refiriéndonos con ello a la industria mobiliaria y la de electrodomésticos, y otra frontera edificio-personas, cuyos consumos independientes del edificio, así como los desplazamientos y la generación de residuos, quedan excluidos (Figura 5.7). Estos límites han sido adoptados anteriormente por otros investigadores [43, 48], que

Tabla 5.3: Listado de actividades durante la fase de postconstrucción. Fuente: Basabe del Castillo (2012)

Mantenimiento	Instalaciones	Contra incendios
		Mecánicas
		Climatización
	Sust. elem. por fin de vida útil	ACS
		Domótica
		Saneamiento
	Limpieza	Cubiertas
		Fachadas
		Interior edif.
Consumos	Electricidad	
	Font., saneam. y basuras	
	Gas	
	Telecomunicaciones	
Personal	Limpieza	
	Mantenimiento	
Reformas y mejoras	Decoración	
	Renov. instalaciones	
	Mejoras efic. energ.	
	Introd. de energ. renov.	
	Adecuación a normativa	
	Accesibilidad	
Reparaciones	Obras de ampliación	
	Incendios y explosiones	
	Deterioro revestimiento	
	Humedades por condensación	
	Humedades por filtración	
	Averías por mal uso	
	Averías por clima	
	Oxidación de metales	
	Ataques por ag. bióticos	
Inundaciones		
Demoliciones	Mecánicas, manuales o voladura	
	Desguaces y desmantelamiento	
	Retirada amianto y fibrocem.	
	Demoliciones selectivas	
	Reciclaje escombros en obra	
	Retirada residuos peligrosos	
	Instalaciones almac., manejo y otros	

también excluyeron de sus cálculos el mobiliario, el equipamiento de cocina y los elementos móviles.

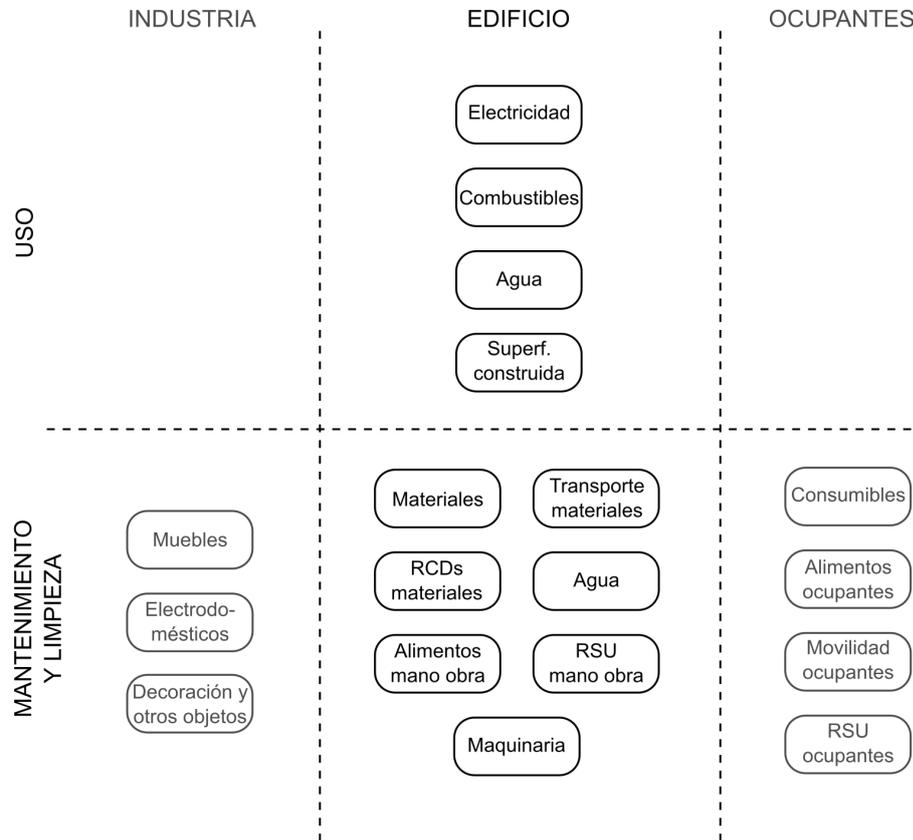


Figura 5.7: Definición de fronteras del estudio. Fuente: Elaboración propia.

Por último, remarcar que ninguno de estos factores hace que se produzcan solapes con la HE de otros edificios, siendo éste uno de los objetivos principales del modelo de cálculo. Para evitar doble contabilidad con la HE de las personas que habitan el edificio solamente se debe tener presente que cualquier fuente de impacto que se haya contabilizado aquí deberá ser excluida de la HE individual de cada uno de ellos.

Aplicando estos límites del sistema a las actividades del listado establecido por Basabe del Castillo, el ámbito de estudio queda perfectamente encuadrado en las siguientes cuatro categorías de acciones del uso y mantenimiento de edificios: consumos de suministros, limpieza, y mantenimiento y renovación de revestimientos, carpinterías e instalaciones. Una vez que se han identificado estos límites, el problema consiste en que no tenemos un modo de calcular en detalle los recursos (mano de obra, maquinaria, herramientas y materiales) necesarios para dichas actividades. Es decir, en España existen bases de costes desglosadas para la construcción o demolición de edificios, pero no así para el mantenimiento de los mismos. A continuación se comentan algunos modelos de atribución de la

responsabilidad ambiental por los impactos provocados, pero en la Sección 5.3 se intentará encontrar una solución a este problema.

5.2.2. Responsabilidad ambiental

Podemos encontrar dos vertientes tradicionales en cuanto a la atribución de responsabilidad por los impactos ambientales. Por un lado, tenemos métodos de cálculo que atribuyen la responsabilidad al productor, cuyo principal ejemplo sería el cálculo de emisiones del Protocolo de Kyoto. Por el contrario, existen planteamientos que atribuyen la responsabilidad del impacto al consumidor final. Este sería el caso del indicador HE, entre otros.

Según el Protocolo de Kyoto, cada país es responsable de las emisiones generadas directamente por los procesos de producción que tienen lugar dentro de sus fronteras [87]. Este modelo de fijación de responsabilidades presenta dos problemas principales. El primero es que no se tiene en cuenta que, con la aparición de las economías abiertas, muchos de los productos elaborados en un país se destinan a la exportación, por lo que son los consumidores finales o intermediarios de otros países los que hacen uso de ellos, y los que se podría considerar que, con su demanda del producto, han provocado esas emisiones. Así, países con un alto índice de exportación, como Noruega con la energía, o China con los productos de bajo coste, se ven afectados por este modelo, obteniendo unas altas cifras de emisiones que a sus respectivos gobiernos, lógicamente, no les parecen justas. Para ello, Bastianoni et al. [88] proponen un indicador llamado Carbon Emission Added (CEA), que asigna a cada país la suma de las emisiones consecuencia de productos de elaboración nacional, más las emisiones asociadas a importaciones.

El segundo problema es que los países que se comprometieron a cumplir con las exigencias del Protocolo de Kyoto, además de comerciar con los derechos de emisiones, se dedican a externalizar ciertos procesos de la producción que generarían gran cantidad de emisiones a países en vías de desarrollo que no firmaron el Protocolo y que cuentan con leyes ambientales menos restrictivas [89].

Por contra, el indicador HE, al estar planteado con una perspectiva de ciclo de vida completo, se basa en el principio de responsabilidad del consumidor. Este principio, definido por Munksgaard y Pedersen [90], afirma que un país es responsable de la polución asociada a su propio consumo de energía y comodidades, independientemente de si esas comodidades fueron producidas dentro del país o importadas. De este modo, para calcular la huella de una población concreta se contabilizan los impactos generados por cada uno de los fabricantes e intermediarios de los productos utilizados, como si el usuario fuera el único responsable de que éstos se produzcan. Este modelo se apoya en una afirmación de Adam Smith [91], en la que dice que “el consumo es el único fin y propósito de toda producción”. Como es lógico, el gobierno chino prefiere utilizar esta opción, ya que alrededor de un 20% de sus emisiones son generadas como consecuencia de la fabricación de productos de exportación que otros países, especialmente los desarrollados, consumen [92].

Evidentemente, ninguno de los dos planteamientos se puede considerar completamente correcto, ya que el productor genera el impacto directamente y obtiene un beneficio, pero el consumidor ha generado la demanda de ese producto. De esta disyuntiva nace el concepto de responsabilidad compartida, que intenta fijar un método para el reparto de responsabilidades entre el suministrador y el receptor, estando estos dos situados en niveles contiguos de una cadena de suministro. Las principales propuestas se apoyan en hipótesis de carácter económico, ya que consideran que el agente que se beneficia económicamente de un daño ecológico es responsable del mismo [93], aunque ese beneficio esté asociado a procesos de producción medioambientalmente intensivos llevados a cabo en otros países, como consecuencia de una externalización de los mismos [94].

En su estudio, Lenzen et al. [95] utilizan el valor añadido por un agente al producto como aproximación de la parte de responsabilidad ambiental que debe asumir. Su razonamiento se basa en que si una organización controla la producción en gran medida, debe retener gran parte de la responsabilidad, y el coste añadido al producto indica, en parte, el control o influencia que la organización tiene sobre la producción. Además, se asume que los procesos de producción que añaden un gran porcentaje de valor al producto normalmente realizan grandes transformaciones del mismo, mientras que aquellas entidades que añaden poco valor suelen operar más bien como un agente intermediario, lo cual es discutible.

Por su parte, Rodrigues et al. [93] proponen un modelo parecido relacionando la responsabilidad ambiental con los flujos económicos de los sectores de producción, y Marques et al. [87] desarrollan otro basado en ingresos, partiendo de la base de que el suministro de materiales primarios para un proceso de producción implica la provisión de mano de obra (o cualquier otro factor primario de producción) a cambio de un salario o ingreso.

Los modelos de responsabilidad compartida tienen una característica que los hace muy potentes, y es la capacidad de forzar a los distintos agentes a establecer un diálogo para mejorar el rendimiento y disminuir el impacto de la cadena de suministro. Estos métodos hacen que a cada agente le afecte el impacto generado por el resto de agentes aguas arriba, y éste, a su vez, afecte al resto aguas abajo. Por tanto, genera una necesidad de compromiso entre todos los agentes que ni el modelo de responsabilidad del productor ni el de responsabilidad del consumidor son capaces de establecer.

El planteamiento de responsabilidad compartida solamente es capaz de ejercer presión si los consumidores comienzan a mostrar una clara preferencia por productores comprometidos con el medio ambiente, obligando así a las compañías a adoptar procesos de producción más limpios. Sin embargo, el precio de esos productos tiende a ser mayor que las alternativas más contaminantes [96], y evidentemente, este factor tiene una gran influencia en la elección de los consumidores que, al no estar motivados por políticas ambientales e incentivos, no se comprometen a asumir el sobreprecio de un producto respetuoso con el medio ambiente [88].

Además, la adopción del criterio de responsabilidad compartida ayudaría a implementar el Protocolo de Kyoto en países menos desarrollados, ya que, a

pesar del aumento en las emisiones que supone derivar etapas de la producción a estos países, al generar un escaso valor añadido sobre el producto, la responsabilidad por dichas emisiones correspondería a los países desarrollados que externalizaron estos procesos, pues son ellos los que obtienen un mayor beneficio económico [97].

Entre las debilidades de estos planteamientos se encuentran: la dificultad de concienciar a cada uno de los miembros de una cadena de suministro, en lugar de solamente al productor y al consumidor; la posibilidad de que existan procesos muy destructivos que sumen poco valor añadido; o el debate sobre si el valor añadido sirve como una buena aproximación para asignar responsabilidades [95]. Respecto a este último punto, una propuesta interesante sería atribuir responsabilidades según la capacidad de un agente determinado para reducir el impacto. Lamentablemente, este planteamiento implica cálculos difíciles de llevar a cabo de una manera objetiva, de modo que, a falta de un modelo mejor, debemos admitir que la aproximación por valor añadido resulta apropiada en la mayoría de los casos, aunque existan excepciones.

Partiendo de que está claro que los impactos ambientales atribuidos a un edificio no deben solaparse con los de otros edificios, nos encontramos con que el problema de la doble contabilidad se presenta a otro nivel. Del mismo modo que el Análisis de Ciclo de Vida, el indicador Huella Ecológica aplicado a sociedades o personas suma todos los impactos aguas arriba incorporados a los bienes de consumo. Si nos fijamos en la cadena de suministro de la Figura 5.8 para un producto envasado en vidrio, la HE del consumidor final es la suma de las huellas de cada uno de los fabricantes e intermediarios, así como de la extracción de arena. Esta huella formaría parte de la HE de la población, pero también de la del fabricante de comida, algo menos en la del fabricante de vidrio, y así sucesivamente. El problema es que cada vez más productores comienzan a calcular sus propias huellas, de modo que se está produciendo no una doble contabilidad, sino una duplicación exponencial de la contabilidad [95].

El modelo de responsabilidad compartida intenta atajar este problema con su reparto de culpas, evitando así los solapes entre las huellas de los distintos agentes de la cadena de producción, pero por lo general, es más común que el problema se aborde mediante la fijación de unos límites del sistema que no dejen lugar a dobles contabilidades.

Entre los estudios que han puesto en práctica este modelo, podríamos destacar el de Cadarso et al. [89], en el que calculan la responsabilidad compartida por sector de actividad, utilizando para ello datos reales de la economía. Del mismo modo, Andrew y Forgie [98] aplican el reparto de responsabilidades de las emisiones de gases de efecto invernadero entre los sectores de la industria de Nueva Zelanda, concluyendo que los habitantes de este país deberían asumir un 29 % de la responsabilidad por las emisiones, frente al 43 % que supondría utilizando el modelo de responsabilidad del consumidor (con un 52 % para el resto del mundo, por las exportaciones, y un 5 % para otras categorías de demanda final).

Aunque estos ejemplos de aplicación son de gran interés, la gran diversidad de relaciones directas que el sector de la construcción tiene con otros sectores de

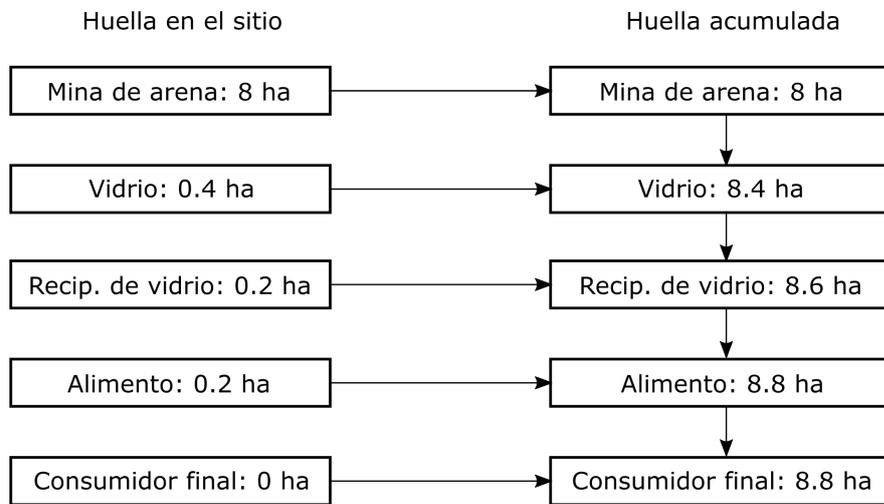


Figura 5.8: Ejemplo de cadena de suministro de un producto alimenticio en botella de vidrio. Fuente: Lenzen, M. *et al.* (2007).

carácter primario hace imposible aplicar un único porcentaje de responsabilidad, ya que no estaríamos teniendo en cuenta los procesos aguas arriba. Si se suman los porcentajes asignados a, digamos, el sector maderero y el del metal, con el del sector de la construcción, se estarían teniendo en cuenta las relaciones que dichos sectores pueden tener con otro tipo de industrias. Por ello, pensamos que la única solución posible por el momento consistiría en una modificación completa de las bases de datos de Análisis de Ciclo de Vida, con asignación de responsabilidades entre los agentes basándose en el inventario de ciclo de vida por fases de la producción, que quedan representadas en el diagrama de flujos del ACV.

Dado que esto no existe por el momento, nos limitamos a recalcar que todo lo que sea contabilizado aquí deberá ser excluido de la HE de los ocupantes del edificio, así como de las industrias relacionadas.

5.3. Clasificación sistemática

Como se mencionó en el Capítulo 4, el siguiente paso de la investigación consiste en generar una estructura o clasificación sistemática para el desarrollo de precios de mantenimiento y limpieza. Después de un periodo de crisis y la consecuente paralización del sector de la construcción, el mantenimiento y la renovación de edificios existentes se ha convertido en la principal actividad, tal como predijeron Kohler y Hassler [99]. Debido a esto, el rol del gestor del edificio o Facility Manager (FM) ha adquirido gran importancia en los últimos años, especialmente en edificios terciarios, como oficinas, centros comerciales, hoteles y hospitales [100]. El FM es responsable del control y coordinación de un gran número de tareas (Figura 5.9), entre las que se incluyen el correcto funcionamiento de las instalaciones, el mantenimiento, y la limpieza regular del edificio.

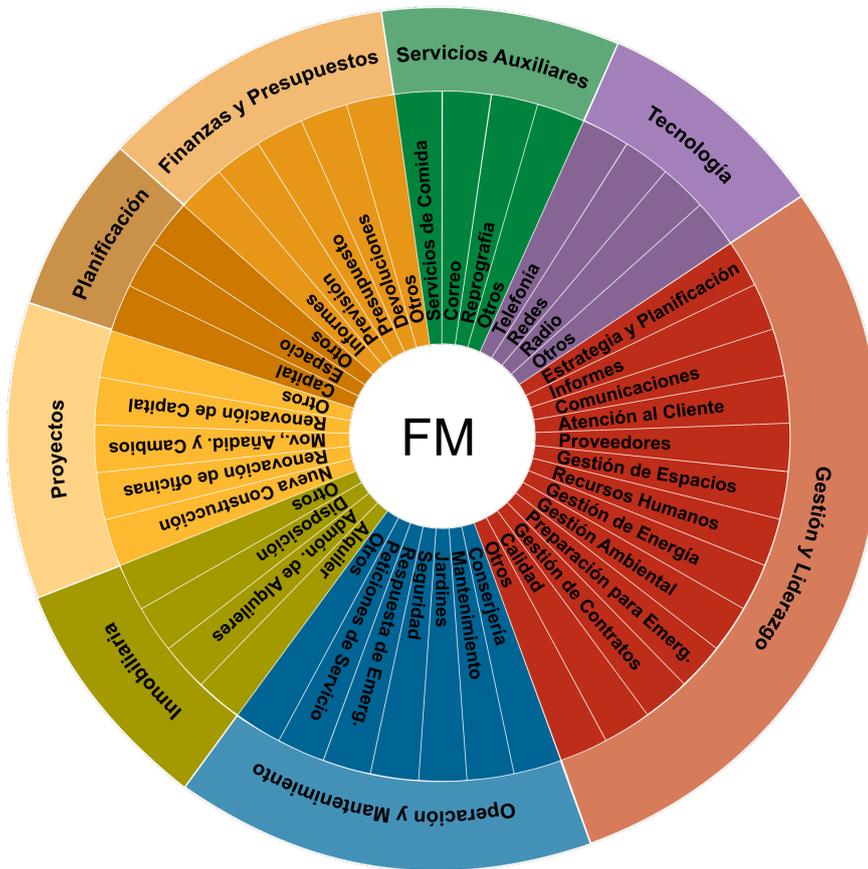


Figura 5.9: Papel y responsabilidades del Facility Manager. Fuente: Michel Theriault (2011).

Para la gestión económica y control de estas tareas, el FM emplea habitualmente cálculos internos producto de su experiencia o, en su lugar, bases de costes operacionales y de mantenimiento, las cuales requieren la compra de li-

cencias que no están al alcance de cualquier comprador. Entre las bases de datos existentes se encuentran BCIS On-line, del Royal Institute of Chartered Surveyors [101]; BLCC, del National Institute of Standards and Technology [102]; ECONPACK, del U.S. Army Corps of Engineers [103]; CostLab, de la Fundación Whitestone Research [104]; y el módulo de mantenimiento decenal de CYPE Ingenieros [105]. La ausencia de bases de datos de acceso abierto impone obstáculos adicionales a la estimación de estos costes desde la fase de diseño de los edificios. El conocimiento anticipado de esta información sería de incalculable valor tanto para el propietario como para el gestor del edificio, y supondría un gran avance en el estudio de los Costes de Ciclo de Vida o Life-Cycle Costs (LCC) de los edificios [106].

El ciclo de vida de un edificio comienza con la fase de diseño y termina con la demolición o rehabilitación del mismo, y en este ámbito quedan incluidos los costes de operación, mantenimiento, reparación o sustitución de elementos, y por último la limpieza [107]. Los costes de operación se refieren a los suministros de energía eléctrica, agua (potable y saneamiento), y combustibles gases y licuados. El mantenimiento recoge un gran número de labores periódicas de revisión y conservación de instalaciones y elementos constructivos, y en caso de detectar desperfectos, la reparación o sustitución de los mismos. Es previsible que en la cuantificación de recursos necesarios para estas labores, en especial en la limpieza, la mano de obra destaque sobre los materiales o la maquinaria. En este ámbito, la frecuencia con que se realiza cada actividad es mucho mayor, lo que nos lleva a plantearnos cuánto cuestan y cuánto impacto ambiental generan durante la vida útil del edificio.

En España existen diversas bases de costes con las que es posible cuantificar los recursos necesarios para la construcción o demolición de edificios. Sin embargo, la limpieza, mantenimiento o reformas en edificios son problemas muy complejos que no se han abordado hasta el momento en nuestro país. Para dar solución a esta cuestión, se propone el desarrollo de precios que recojan los costes e impacto ambiental de las mismas. Los precios se plantean siguiendo las pautas de la Base de Costes de la Construcción de Andalucía (BCCA) [108], escogida por tener una estructura sólida y de acceso gratuito. Por otro lado, las Referencias de Costes de Mantenimiento y Reparación y de Costes de Operación de Edificios de Whitestone Research [109, 110] constituyen la fuente más fiable, completa y abierta que ha sido posible encontrar. En ellos se desarrolla una base de datos para el cálculo de costes operacionales y de mantenimiento para diversos perfiles o tipologías de edificios, expresados por unidad de área, y en algunos casos por ocupante. Además, incluye una base de costes de tareas de mantenimiento que, aunque no vienen descompuestas con mucho detalle, nos pueden servir de apoyo en este trabajo.

5.3.1. Estructura propuesta

La BCCA cuenta con una clasificación sistemática consolidada con el transcurso de los años. Los precios siguen una estructura jerárquica en la que Precios Básicos (PB) y Auxiliares (PA) combinados componen los Precios Unitarios (PU) o partidas que finalmente conforman el Presupuesto de Ejecución Mate-

rial [111]. Los PU se identifican mediante códigos de 10 caracteres alfanuméricos: 2 cifras que representan la etapa del proceso constructivo, 3 letras para especificar la categoría del elemento en cuestión, y 5 cifras más para la numeración de cada precio específico. Con este sistema se establece una correspondencia biunívoca entre códigos y precios [112].

La estructura utilizada para la descomposición de un Precio Unitario Simple (PUS) sigue el esquema de la Tabla 5.4, con una descripción breve del concepto del precio, la descripción completa del mismo en detalle, el criterio de medición a utilizar, y la lista de precios que lo componen expresando su cantidad, precio unitario e importe total, con los que finalmente se calculan los costes directos, indirectos, y total del precio completo.

Tabla 5.4: Esquema de un Precio Unitario Simple de la BCCA. Fuente: Barón Cano *et al.* (2014)

CÓD. PUS	ud	DESCRIPCIÓN CORTA			
Descripción completa.					
Criterio de medición.					
CÓDIGO	UD	CONCEPTO	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
Código P1	ud	DESCRIPCIÓN CORTA P1			
Código P2	ud	DESCRIPCIÓN CORTA P2			
Costes Directos					
% CI					
TOTAL					

En la clasificación sistemática de la BCCA se cubren todas las fases del proceso de construcción en capítulos separados, desde la demolición y trabajos previos hasta las pinturas y equipamiento, así como capítulos enfocados a urbanización, gestión de residuos, y medidas de seguridad y salud, siendo este último el capítulo 19. En esta sección se propone una ampliación de la clasificación sistemática de la BCCA para un nuevo capítulo referido al uso, mantenimiento y limpieza de edificios. Dado que todos los capítulos existentes están relacionados con la fase de construcción, se ha estimado conveniente que el uso y mantenimiento, por tratarse de otra fase del ciclo de vida del edificio, comience en un nuevo capítulo posterior a todos ellos, en este caso el 20. Este capítulo contendrá las labores de limpieza, revisiones periódicas, reparaciones o sustituciones, y acciones para la conservación del buen funcionamiento de los elementos constructivos.

La asignación de los 3 caracteres siguientes supone un problema inicial en la estructura, ya que la utilización de todos ellos para definir la categoría del elemento constructivo, como se hace en el resto de capítulos, provoca que los grupos de partidas queden muy reducidos, siendo habitualmente cinco o seis (conservación, limpieza, revisión, reparación, renovación y varios) por grupo. Para evitar esta situación, se propone que en este capítulo los elementos constructivos se definan mediante las dos primeras letras, con lo que se forman conjuntos más generales con un mayor número de elementos dentro (Tabla 5.5), mientras que la tercera letra se utiliza para especificar el tipo de labor a realizar (Tabla 5.6).

CAPÍTULO 5. MODELO TEÓRICO

Tabla 5.5: Propuesta de codificación para subcapítulos y apartados del Capítulo 20: Uso y Mantenimiento

Subcapítulos		Apartados	
20A	AISLAMIENTOS	20AV 20AW	Aislamientos vistos Varios
20C	CIMENTACIONES	20CL 20CM 20CW	Losas Muros pantalla Varios
20D	DIVISIONES INT.	20DB 20DD 20DM 20DP 20DW	Barandillas Divisiones Mamparas Puertas Varios
20E	ESTRUCTURAS	20EA 20EF 20EH 20EM 20EW	Acero Forjados Hormigón Madera Varios
20F	FACHADAS	20FC 20FP 20FW	Carpintería y protección Paredes Varios
20I	INSTALACIONES	20IA 20IC 20IE 20IF 20II 20IK 20IL 20IM 20IN 20IP 20IR 20IS 20IV 20IW	Aire acondicionado Calefacción Electricidad Fontanería Iluminación Comunicación Gases y licuados Electro-mecánicas Energía solar Protecciones Evacuación de residuos Saneamiento Ventilación Varios
20M	MOBILIARIO	20MA 20MC 20MD 20ME 20MK 20ML 20MM 20MS 20MW	Aseos y baños Cocinas Dormitorios Estanterías y armarios Decoración Lámparas Mesas Sillas, sofás y sillones Varios
20P	ESPACIOS INT.	20PA 20PB 20PC 20PD 20PE 20PK 20PL 20PM 20PO 20PP 20PS	Aseos y baños Bibliotecas y aulas Cocinas Dormitorios Escaleras y rampas Comedores y cafeterías Laboratorios Almacenes Oficinas y despachos Pasillos y distribuidores Salones y salas

Tabla 5.5 – continúa en la siguiente página

Tabla 5.5 – continuación de la anterior			
Subcapítulos		Apartados	
		20PV	Vestíbulos
		20PW	Varios
20Q	CUBIERTAS	20QH	Horizontales
		20QI	Inclinadas
		20QW	Varios
20R	REVESTIMIENTOS	20RA	Aplacados
		20RC	Continuos
		20RL	Ligeros
		20RP	Pinturas
		20RS	Suelos
		20RT	Techos
		20RW	Varios
20U	URBANIZACIONES	20UA	Alcantarillado
		20UD	Instalaciones deportivas y de ocio
		20UE	Electricidad
		20UJ	Jardinería
		20UM	Mobiliario urbano
		20UP	Pavimentos
		20UR	Sistemas de riego
		20US	Suministro de agua
		20RW	Varios
20W	VARIOS	20WW	Varios

Se propone dividir los tipos de tareas en conservación, entendida como los ajustes o limpiezas de elementos que permiten mantener el correcto funcionamiento de los mismos, o lo que se suele conocer como mantenimiento preventivo; limpieza, con la que se mantiene el buen aspecto de las superficies visibles del edificio durante su uso; renovaciones, en las que se engloban las sustituciones de los diferentes revestimientos e instalaciones al fin de su vida útil; reparaciones, o mantenimiento correctivo; revisiones, de carácter periódico, también conocidas como mantenimiento predictivo; y finalmente el grupo de varios, en el que entrarían todas aquellas tareas que no encajan en los anteriores grupos.

Tabla 5.6: Propuesta de codificación de grupos por tipo de tarea

Código	Tipo de tarea
20-C	Conservaciones
20-L	Limpiezas
20-N	Renovaciones
20-R	Reparaciones
20-V	Revisiones
20-W	Varios

En cuanto a las 5 últimas cifras del código, además de numerar de manera biunívoca las partidas, se pretende que al menos la primera cifra indique en cierto modo la periodicidad con que se llevan a cabo ciertas tareas, para así facilitar en la medida de lo posible la localización de la partida buscada. Los valores

elegidos para representar las periodicidades son los que se presentan en la Tabla 5.7.

Los precios correspondientes a las tareas de mantenimiento se desarrollan en Precios Unitarios Complejos (PUC) cuando engloban varios Precios Unitarios Simples (PUS), o en PUS cuando éstos conforman acciones para las que se pueden cuantificar directamente la mano de obra, materiales y maquinaria necesarios para llevarlas a cabo. En general, los PUC se utilizarán para tareas de reparación o renovación, ya que éstas suelen englobar tareas de demolición y nueva ejecución del elemento constructivo que ya existen en la BCCA, a veces con alguna ligera modificación.

Para las tareas de limpieza se utilizan Precios Unitarios Simples (PUS) para la limpieza de superficies o elementos del mobiliario del edificio sin una periodicidad concreta, mientras que para la limpieza periódica de los distintos tipos de estancias (ver subcapítulo 20P en Tabla 5.5) se desarrollan Precios Unitarios Funcionales (PUF), en los cuales se incluyen algunos de los anteriores.

Tabla 5.7: Propuesta de codificación de la periodicidad de las tareas

Código	Periodicidad
00000	Horario
10000	Diario
20000	Semanal
30000	Mensual
40000	Anual
50000	Decenal
60000	Cada 20 años
70000	Cada 30 años
80000	> 40 años
90000	Indeterminado

5.3.2. Singularidades de los costes de mantenimiento y limpieza

Para la elaboración de los PUS nos basamos en los Precios Básicos (PB), que representan los materiales y herramientas utilizados, mano de obra, y maquinaria necesaria para las tareas. Obviamente, es necesario elaborar nuevos PB, ya que todos los recursos necesarios para las tareas de mantenimiento y limpieza no tienen su entrada correspondiente en la BCCA. Esto es sencillo para los materiales y mano de obra. Sin embargo, no ocurre igual con las herramientas, ya que en este tipo de tareas, los profesionales que las llevan a cabo suelen contar con un kit de herramientas y productos que portan en un maletín o un carro.

Este problema se puede abordar de dos maneras distintas. La primera consiste en especificar en cada partida los productos y herramientas exactos que se van a utilizar, lo cual restringe la flexibilidad de las partidas pero las dota de una mayor exactitud en cuanto al cálculo del precio y el impacto ambiental. La segunda opción implica el cálculo de un precio de conjunto herramientas completo, incluyendo todos los productos y utensilios que porta. Esta opción

simplifica los cálculos y la elaboración de partidas y reduce el número de PB y PUS generados, pero produce resultados menos exactos. Para este trabajo se ha escogido la segunda opción por ser la más viable e interesante. La estimación de la cantidad de producto limpiador utilizada para cada m² de superficie es muy complicada, mientras que el método que aquí se explica lleva a cabo dicha estimación de manera indirecta a través de las frecuencias de renovación de los distintos productos.

En la Tabla 5.8 se presenta un ejemplo de cálculo para un carro de limpieza profesional. Para cada utensilio o producto se obtuvieron su frecuencia de renovación, coste, peso, y material base. A cada material se le aplicó el factor de emisión correspondiente obtenido de la base de datos Ecoinvent [113], que tras un estudio exhaustivo fue confirmada como la base de datos de ACV más completa y adecuada para su utilización en el sector de la edificación [18,114]. Tomando del convenio colectivo del sector de la limpieza en Andalucía [115] un valor de 1515 horas trabajadas por año, se obtiene (última línea de la Tabla 5.8) el coste por hora de utilización del carro de limpieza (0,69 €/h), las emisiones de CO₂ (0,227 kgCO₂/h), y el peso total de la compra anual de los productos y utensilios (395,734 kg/año) y de los RSU generados (86,412 kg/año). Los dos últimos factores son distintos debido a que para la generación de RSU, en los productos de limpieza se contabiliza solamente el recipiente vacío.

El mismo cálculo se ha hecho para un maletín de mantenimiento y las cajas de herramientas de distintos gremios: frigorista, carpintero, electricista, y herrero. Por otro lado, los productos y herramientas de limpieza que utiliza un profesional del sector no se pueden contabilizar de igual manera que los que usa una persona en su propia vivienda. El profesional lleva un carro de limpieza, con más cantidad de utensilios y productos, y la frecuencia de renovación de los mismos es mucho mayor. Aunque la mayoría de estos utensilios y productos son los que tenemos para la limpieza en casa, tenemos menos cantidad, los renovamos con menor frecuencia, y están guardados en un armario en lugar de ir en un carro. Por todo esto se considera esencial distinguir entre dos tipos de ámbito en los que se lleva a cabo la limpieza: ámbito doméstico, y edificios públicos. Lo mismo ocurre con otras tareas de mantenimiento que una persona puede llevar a cabo en su vivienda sin necesidad de acudir a un profesional, como pueden ser la sustitución de bombillas o la reparación de pequeños desconchados de pintura. Por tanto, es necesario definir el contenido de un kit de limpieza doméstico y de una caja de herramientas doméstica. En el estudio de todos los conjuntos de herramientas, tanto el transporte al lugar de trabajo como los residuos generados al fin de su vida útil han sido desestimados por ser mínimamente significativos. Los resultados finales se muestran en la Tabla 5.9, aunque las tablas completas se pueden consultar en el Anexo A.

Dicha distinción entre los dos tipos de ámbito influye también en la mano de obra. Para las tareas que requieran de un profesional utilizaremos el PB correspondiente, ya sea el de peón especial o un oficial, mientras que para las tareas que puede realizar uno mismo en el ámbito doméstico se genera una nueva figura (PB) de empleado doméstico. En principio se considera que el empleado doméstico no está asalariado, por lo que su coste es nulo, aunque su impacto ambiental no lo será.

Tabla 5.8: Cálculo del coste e impacto ambiental de un carro de limpieza con los productos y utensilios necesarios

ELEMENTO	RENOV. (años)	PRECIO (€)	COSTE H. (€/h)	MATERIAL BASE	FACT. EMIS. (kgCO ₂ /kg)	PESO (kg)	PESO AN. (kg/año)	EMIS. H. (kgCO ₂ /h)	PESO RSU (kg/año)
Carro limpieza	5,000	137,09	0,02	Polipropileno	2,858	14,000	2,800	0,005	2,800
Mopa	0,043	4,83	0,07	Algodón	8,909	0,515	11,977	0,070	11,977
Paños (3)	0,167	3,70	0,01	Políster	9,601	0,117	0,701	0,004	0,701
Cubos (2)	1,000	15,92	0,01	Polipropileno	2,858	0,350	0,350	0,001	0,350
Palos esc./freg. (4)	0,500	14,52	0,02	Aluminio	7,247	0,984	1,968	0,009	1,968
Fregonas (2)	0,083	2,42	0,02	Algodón	8,909	0,440	5,301	0,031	5,301
Escoba	0,250	1,20	0,00	PET	7,754	0,225	0,900	0,005	0,900
Recogedor	1,000	1,44	0,00	Polipropileno	2,858	0,135	0,135	0,000	0,135
Bolsa basura	0,004	0,16	0,03	Poliétileno (LDPE)	2,096	0,010	2,500	0,003	2,500
Bolsas papeleras	0,009	0,91	0,07	Poliétileno (LDPE)	2,096	0,150	16,667	0,023	16,667
Goma limpiacristales	2,000	10,32	0,00	Acero cromado	7,446	0,211	0,106	0,001	0,106
Pala lavavidrios	0,250	1,72	0,00	Goma sintética	2,394	0,070	0,280	0,000	0,280
Yellon lavavidrios	1,000	6,46	0,00	Algodón	8,909	0,120	0,060	0,000	0,060
Guantes deshechables	0,004	0,01	0,00	Poliétileno (LDPE)	2,096	0,005	1,250	0,002	1,250
Rollo papel 120m	0,065	2,71	0,03	Papel	-0,675	1,512	23,262	-0,010	23,262
Plumero avestruz	0,250	5,45	0,01	Polipropileno	2,858	0,055	0,220	0,000	0,220
Plumero antiestático	0,250	1,33	0,00	Polipropileno	2,858	0,115	0,460	0,001	0,460
Lejía (5L)	0,043	6,62	0,10	Tensioactivos (15%)	0,374	5,000	116,279	0,029	6,202
Limp. neutro (1.5L)	0,043	2,24	0,03	Tensioactivos (15%)	0,374	1,500	34,884	0,009	1,860
Limp. baños (750ml)	0,250	2,77	0,01	Tensioactivos (15%)	0,374	0,750	3,000	0,001	0,160
Fregonas (1L)	0,022	1,50	0,04	Tensioactivos (15%)	0,374	1,000	45,455	0,011	2,424
Spray mucles (450ml)	0,167	4,68	0,02	Tensioactivos (15%)	0,374	0,450	2,695	0,001	0,144
Spray mopas (750ml)	0,250	2,15	0,01	Tensioactivos (15%)	0,374	0,750	3,000	0,001	0,160
Limp. jabonoso (1L)	0,167	3,52	0,01	Tensioactivos (15%)	0,374	1,000	5,988	0,001	0,319
Limpiacrist. (750ml)	0,083	0,90	0,01	Tensioactivos (15%)	0,374	0,750	9,036	0,002	0,482
Quitainrias (750ml)	0,043	3,65	0,06	Tensioactivos (15%)	0,374	0,750	17,442	0,004	0,930
Relleno gel (5L)	0,065	5,12	0,05	Tensioactivos (15%)	0,374	5,000	76,923	0,019	4,103
Ambientador (1L)	0,083	4,36	0,03	Tensioactivos (15%)	0,374	1,000	12,048	0,003	0,643
TOTAL			0,69				395,734	0,227	86,412

Tabla 5.9: Coste y factor de emisión de herramientas de distintos gremios

Gremio	Coste (€/h)	F. Emis. (kgCO₂/h)
Mantenimiento	0,03	0,002
Frigorista	0,05	0,003
Electricista	0,04	0,002
Carpintero	0,04	0,004
Herrero	0,02	0,002
Carro Limpieza	0,69	0,227
Caja Herram. Dom.	0,02	0,001
Kit Limpieza Dom.	0,07	0,025

Otra peculiaridad, ya particular de las tareas de limpieza, es que el rendimiento al limpiar una superficie depende de su rugosidad, posición, el porcentaje ocupado por obstáculos, y en ocasiones el desorden de los ocupantes, ya que todos ellos pueden ralentizar el proceso de limpieza. Además, la cantidad de obstáculos depende del tipo de estancia a limpiar, y esto nos conduce a otra peculiaridad con respecto a la fase de construcción. La BCCA clasifica las tareas por elemento constructivo, pero lo que se limpia realmente son espacios que contienen alguno de estos elementos. Al mismo tiempo, un mismo espacio se limpia con distintas periodicidades, y en cada una de éstas, sólo se limpian algunos de los elementos contenidos en él. Por ello es necesario incluir tanto la periodicidad como el tipo de espacio funcional en la descripción del precio.

Este método de dividir un edificio en espacios funcionales surgió como una idea llamada MaClar [116], además de encontrarse también en algunos estándares internacionales como Omniclass [117] o la ISO 12006-2:2015 [118]. El modelo MaClar propone la estimación de costes de construcción desde la fase de diseño dividiendo el edificio en células funcionales. Estas células se entienden como espacios o conjuntos de elementos constructivos que no se solapan entre sí, evitando de este modo duplicidades en la estimación de costes. Dado que se pretende que las pocas adaptaciones que haya que hacer de la medición clásica de un proyecto a una que permita la estimación de los costes de uso y mantenimiento sean lo más sencillas posible, los distintos tipos de estancia observados en los estándares antes mencionados han sido reducidos a los contenidos en el subcapítulo 20P de la Tabla 5.5, con diferenciaciones según su superficie útil o aforo, según corresponda.

En cuanto a las frecuencias con que se llevan a cabo las tareas, en algunos estudios centrados en la limpieza de suelos de edificios residenciales se asigna una periodicidad semanal, ya sea para el aspirado o para el barrido y fregado de todos los tipos de suelo [119], o se toman tres frecuencias diferentes para cada tarea, generando así tres escenarios de hábitos de limpieza de los ocupantes [120]. En el estudio de caso del presente trabajo se fijarán frecuencias mucho mayores, ya que el uso del edificio, una residencia universitaria, tiene asociadas unas exigencias de limpieza superiores para mantener la satisfacción de los clientes.

Las tareas de limpieza se estructuran entonces como se muestra en el ejemplo de la Figura 5.10, con PUFs en el nivel superior, donde se especifica la frecuencia de las tareas y el espacio donde se ejecutan. En el ejemplo, la limpieza de una

cocina industrial tres veces al día se compone de fregado de suelo y limpieza de fregaderos, encimeras y mesas, que pertenecen al nivel inmediatamente inferior (PUS). Cada una de estas tareas consume recursos (PBs), incluyendo el carro de limpieza, el peón especial y, en algunos casos, agua potable. Estos recursos se clasifican a posteriori en las distintas fuentes de impacto (materiales, mano de obra y maquinaria), lo que marcará el método para traducirlos a términos de impacto ambiental.

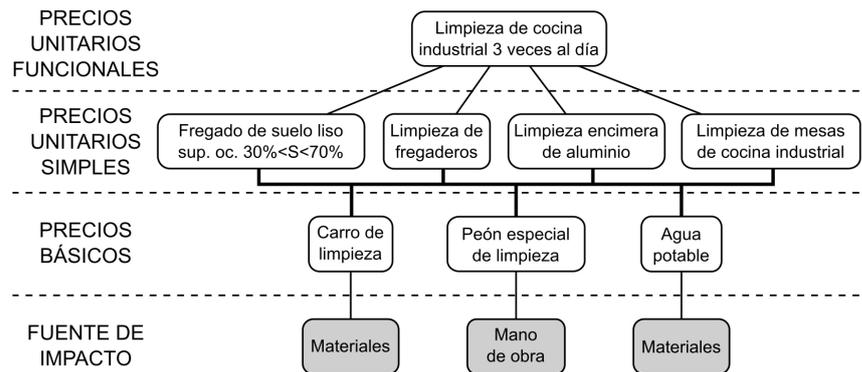


Figura 5.10: Estructura de un Precio Unitario Funcional de limpieza

Como se puede observar, en este modelo el agua potable utilizada para limpiar se considera un material. Es importante contabilizar esta cantidad de agua para que se pueda predecir su consumo con una medición desde la fase de diseño de un edificio. Sin embargo, también debemos tener en cuenta que para un edificio existente, el consumo de agua contabilizado aquí deberá restarse del consumo de agua obtenido por datos de facturación. Para la mano de obra utilizaremos la figura del Peón Especial de Limpieza, similar al Peón Especial que ya existe en la BCCA, solo que aplicando un coste horario de 14,62 € obtenido del convenio colectivo antes mencionado. En este estudio no se ha contemplado el uso de maquinaria para mecanizar el proceso de limpieza, ya que la gran mayoría de las tareas son siempre manuales. Sí que se considera su uso en tareas de mantenimiento o renovación de elementos constructivos.

Por último, como costes indirectos, siendo estos aquellos que no son imputables directamente a una única tarea, para la limpieza se ha considerado un encargado que supervisa y coordina el trabajo de los peones en la jornada diaria, mientras que en mantenimiento no se contemplan costes indirectos. Los medios auxiliares utilizados han sido incluidos como coste directo. Aunque se estima una periodicidad concreta para las tareas de mantenimiento, esto no quiere decir que aquellas con una misma periodicidad se lleven a cabo en el mismo momento, sino que podrían ocurrir algunos años antes o después de lo estimado. Por ello cada tarea de mantenimiento se debe considerar como una pequeña obra independiente de las demás, de modo que todos los costes asociados son imputables de forma directa a la misma.

5.3.3. Ejemplos de precios de mantenimiento y limpieza

Partiendo de los conceptos y singularidades definidos en los anteriores apartados, veamos dos ejemplos de precios desarrollados: uno de mantenimiento y otro de limpieza. En la Tabla 5.10 se muestra un Precio Unitario Complejo de renovación de solado con baldosas de mármol blanco Macael con aprovechamiento del 50 % de las baldosas existentes. El código de dicho precio indica que está clasificado en el capítulo 20, de Uso y Mantenimiento, subcapítulo R: Revestimientos, Apartado S: Suelos, Grupo N: Renovaciones, y por sus últimas cinco cifras podemos averiguar que esta tarea está programada para llevarse a cabo cada 75 años aproximadamente. Nótese además que en el criterio de medición aparece “Medida la superficie en proyecto”. Al estar estos precios enfocados a la estimación de costes desde la fase de proyecto, se supone que la medición de esta partida será la transferida de la de ejecución del mismo solado en la fase de construcción.

Tabla 5.10: Ejemplo de Precio Unitario Complejo de renovación de solado de mármol blanco Macael

CÓDIGO	UD	CONCEPTO	CANT.	PREC.	IMP.
20RSN87510	m2	RENOVACIÓN DE SOLADO BALD. MÁRMOL “BLANCO MACAEL” 40x40 cm ABRILL. REUTILIZ. 50 %			
Renovación de solado con baldosas de mármol blanco Macael de 40x40 cm y 2 cm de espesor, formada por: demolición selectiva con medios manuales de solado y rodapié con reutilización del 50 %, colocación de nueva solería abrigantada, incluso pp. de rodapié.					
Medida la superficie en proyecto.					
CÓDIGO	UD	CONCEPTO	CANT.	PREC.	IMP.
01RSN90110	m2	DEMOLICIÓN SELECTIVA M. MANUALES DE SOLADO Y RODAPIÉ PIEDRA NAT. REUTILIZ. 50 %	1,000	7,08	7,08
10SNS00020	m2	SOLADO BALD. MÁRMOL “BLANCO MACAEL” 40x40 cm ABRILL. REUTILIZ. 50 %	1,000	29,30	29,30
10SNR90005	m	RODAPIÉ MÁRMOL “BLANCO MACAEL” 40x10 cm REUTILIZ. 50 %	1,100	8,34	9,18
Costes Directos					46,42
0 % CIE					0,00
TOTAL					46,42

Este PUC se compone de tres PUS, uno de demolición selectiva con recuperación de baldosas (Tabla 5.11), otro para la ejecución del nuevo solado (Tabla 5.12), y finalmente otro que representa la parte proporcional de ejecución de rodapié tomando como hipótesis estancias de unos 12 m² con una puerta de 0,90 cm de ancho en la que no habría rodapié (Tabla 5.13). En la ejecución del solado, así como en la del rodapié, las cantidades requeridas de baldosas son la mitad de las habituales debido a que se ha asumido la reutilización del 50 % de las que se retiran en la demolición.

En cuanto a los precios de limpieza, el ejemplo que se muestra en la Tabla 5.14 consiste en la limpieza dos veces por semana en oficinas de entre 20 y 40 m². Este precio queda clasificado en el capítulo 20, subcapítulo P: Espacios Interiores, apartado O: Oficinas y despachos, grupo L: Limpiezas, y tanto su código como la descripción indican una periodicidad de 3 días. Además es un Precio Unitario Funcional, ya que hace alusión a un tipo de espacio funcional del edificio, especificando también un tamaño de la estancia, y con ello los elementos que contendrá.

CAPÍTULO 5. MODELO TEÓRICO

Tabla 5.11: Precio Unitario Simple de demolición de solado de mármol blanco Macael con recuperación de piezas

01RSN90110	m2	DEMOLICIÓN SELECTIVA M. MANUALES DE SOLADO Y RODAPIÉ PIEDRA NAT. REUTILIZ. 50 %			
Demolición selectiva con medios manuales de solado y rodapié de piedra natural, con reutilización en la obra del 50 %.					
Medida la superficie inicial.					
CÓDIGO	UD	CONCEPTO	CANT.	PREC.	IMP.
TP00100	h	PEÓN ESPECIAL	0,388	18,24	7,08
Costes Directos					7,08
0% CIE					0,00
TOTAL					7,08

Tabla 5.12: Precio Unitario Simple de solado de mármol blanco Macael con reutilización de piezas

10SNS00020	m2	SOLADO BALD. MÁRMOL "BLANCO MACAEL" 40x40 cm ABRILL. REUTILIZ. 50 %			
Solado con baldosas de mármol blanco Macael de 40x40 cm y 2 cm de espesor, procedentes de reutilización en un 50 %, recibidas con mortero M5 (1:6), incluso nivelado con capa de arena de 2 cm de espesor enlechado, pulido, abrillantado y limpieza del pavimento; construido según CTE.					
Medida la superficie ejecutada.					
CÓDIGO	UD	CONCEPTO	CANT.	PREC.	IMP.
TO01100	h	OF. 1ª SOLADOR	0,365	21,86	7,98
TP00100	h	PEÓN ESPECIAL	0,185	18,24	3,37
AA00200	m3	ARENA FINA	0,020	8,39	0,17
AGL00100	m3	LECHADA DE CEMENTO CEM II/A-L 32,5 N	0,001	113,90	0,11
AGM00500	m3	MORTERO DE CEMENTO M5 (1:6) CEM II/A-L 32,5 N	0,021	50,00	1,05
RS02800	m2	BALDOSA MÁRMOL BLANCO MACAEL 40x40 cm	0,525	24,62	12,93
RS08200	h	PULIDO ABRILLANTADO DE SOLERÍA	1,000	3,69	3,69
Costes Directos					29,30
0% CIE					0,00
TOTAL					29,30

Tabla 5.13: Precio Unitario Simple de rodapié de mármol blanco Macael con reutilización de piezas

10SNR90005	m2	RODAPIÉ MÁRMOL "BLANCO MACAEL" 40x10 cm REUTILIZ. 50 %			
Rodapié de mármol blanco Macael de 40x10 cm y 2 cm de espesor procedentes de reutilización en un 50 %, recibido con mortero M5 (1:6), incluso repaso, enlechado y limpieza.					
Medida la longitud ejecutada.					
CÓDIGO	UD	CONCEPTO	CANT.	PREC.	IMP.
TO01100	h	OF. 1ª SOLADOR	0,120	21,86	2,62
TP00100	h	PEÓN ESPECIAL	0,060	18,24	1,09
AGL00100	m3	LECHADA DE CEMENTO CEM II/A-L 32,5 N	0,001	113,90	0,11
AGM00500	m3	MORTERO DE CEMENTO M5 (1:6) CEM II/A-L 32,5 N	0,001	50,00	0,05
RS06000	m	RODAPIÉ MÁRMOL BLANCO MACAEL 40x10 cm	1,313	3,40	4,46
Costes Directos					8,34
0% CIE					0,00
TOTAL					8,34

Destacar que al querer sintetizar diferentes labores por el tipo de estancia se pierde el factor de superficie. Sin embargo, es posible definir rangos de superficie útil o, en algunos casos, de aforo, dentro de los cuales los rendimientos no varían drásticamente. De este modo, se crean partidas para salones de actos con capacidad para menos de 50 personas, entre 50 y 100, y para más de 100, o para despachos u oficinas de menos de 20 m² o entre 20 y 40 m². En cada uno de estos casos varían tanto la superficie de suelos o paredes como los elementos de mobiliario contenidos en la estancia.

Tabla 5.14: Precio Unitario Funcional de limpieza dos veces por semana en oficina de entre 20 y 40 m²

CÓDIGO	UD	CONCEPTO	CANT.	PREC.	IMP.
20POL13021	u	LIMPIEZA 2 VECES POR SEMANA EN OFICINA 20M2<S<40M2			
Limpieza dos veces por semana en oficina con superficie útil entre 20 y 40 m2 y capacidad para entre 2 y 4 puestos de trabajo, formada por: barrido de suelo y limpieza de mesas de trabajo.					
Medida la cantidad ejecutada dos veces por semana.					
20RSL90006	m2	BARRIDO DE SUELO LISO SUP. OC. 30%<S<70% EDIF. PÚBL.	30,000	0,06	1,78
20MML90015	u	LIMPIEZA DE MESA DE TRABAJO EDIF. PÚBL.	3,000	0,12	0,37
Costes Directos					2,15
8 % CIE					0,18
TOTAL					2,33

Como se puede ver en este ejemplo, con una frecuencia de dos veces semanales se asume que en una oficina de este tamaño se barre el suelo y se limpian las mesas de trabajo. El resto de elementos se limpiarán con otras frecuencias. Dada la superficie de la oficina, se estima que estará ocupada por obstáculos (mesas y sillas) en aproximadamente un 30-70 %, y que contará con 2-4 puestos de trabajo. En el PUS correspondiente al barrido de suelo (Tabla 5.15) se especifica la presencia o no de juntas por embaldosado y la porción de superficie ocupada por obstáculos, ya que estos son dos factores que influirán en el rendimiento del trabajador al barrer, como ya se mencionó en el apartado anterior. El tiempo estimado para esta tarea se aplica tanto al operario como al carro de limpieza, y en el presente trabajo se han estimado según la Tabla 5.17. Para la limpieza de una mesa de trabajo se ha estimado un tiempo aproximado de 30 segundos (Tabla 5.16).

Tabla 5.15: Precio Unitario Simple de barrido de suelo liso con una ocupación de su superficie por obstáculos entre un 30 y un 70 %

CÓDIGO	UD	CONCEPTO	CANT.	PREC.	IMP.
20RSL90006	m2	BARRIDO DE SUELO LISO SUP. OC. 30%<S<70% EDIF. PÚBL.			
Barrido de suelo liso sin juntas en edificio público, con superficie ocupada por obstáculos entre un 30 y un 70 %.					
Medida la superficie ejecutada.					
TP00500	h	PEÓN ESPECIAL LIMPIEZA	0,004	14,62	0,06
JL00100	h	CARRO LIMPIEZA	0,004	0,69	0,00
Costes Directos					0,06
8 % CIE					0,00
TOTAL					0,06

Tras el desarrollo de varios ejemplos de partidas, la estructura propuesta se muestra suficientemente robusta para soportar la implementación de precios

Tabla 5.16: Precio Unitario Simple de limpieza de mesa o escritorio de trabajo

20MML90015		u	LIMPIEZA DE MESA DE TRABAJO EDIF. PÚBL.		
Limpieza de mesa de trabajo en edificio público, con producto limpiamuebles.					
Medida la cantidad ejecutada.					
CÓDIGO	UD	CONCEPTO	CANT.	PREC.	IMP.
TP00500	h	PEÓN ESPECIAL LIMPIEZA	0,008	14,62	0,12
JL00100	h	CARRO LIMPIEZA	0,008	0,69	0,01
Costes Directos					0,12
8% CIE					0,01
TOTAL					0,13

Tabla 5.17: Tiempos estimados para barrido y fregado de suelos según rugosidad y presencia de obstáculos

Acción	Rugosidad	Obstáculos (%)	Tiempo (s/m ²)
Barrido	Liso	<10	8
		10-30	10
		30-70	14
		>70	18
	Cerámico	<10	10
		10-30	14
		30-70	18
		>70	20
	Cemento	<10	16
		10-30	18
		30-70	22
		>70	24
Fregado	Liso	<10	10
		10-30	14
		30-70	18
		>70	22
	Cerámico	<10	12
		10-30	16
		30-70	20
		>70	24
	Cemento	<10	16
		10-30	20
		30-70	24
		>70	28

para todas las tareas de la fase de uso y mantenimiento de edificios, lo cual supone un salto cualitativo en el cálculo de los Costes de Ciclo de Vida. Para este trabajo se han desarrollado 205 PUF (Anexo B.1), 120 PUC (Anexo B.2), 269 PUS (Anexo B.3) sin contar con las versiones modificadas de otros ya existentes, dos PA (Anexo B.4), y al menos 18 PB (Anexo B.5). Para calcular los costes totales acumulativos durante toda la vida útil del edificio habrá que estimar una tasa de descuento que permita actualizar los costes a términos del año actual.

5.4. Banco de Cuantificación de Recursos

Una vez visto cómo se puede desarrollar una estructura que permita la medición de las tareas de mantenimiento y limpieza, el siguiente paso es obtener, a través de dicha medición, una cuantificación de los recursos necesarios para llevar a cabo esas tareas. Para ello, en este trabajo se ha diseñado una medición dividida en dos categorías distintas: mantenimiento y limpieza.

Como se explicó en el apartado anterior, al querer que la medición del mantenimiento y limpieza se integre correctamente con la medición clásica del proyecto, los elementos a los que hay que hacer tareas de mantenimiento tendrán su medición transferida desde la fase de construcción. Es decir, la cantidad de m^2 de suelo de baldosa de mármol “blanco Macael” que habrá que mantener durante la vida útil del edificio será la misma que figura en la fase de construcción del proyecto. Lo mismo ocurre con las instalaciones, pinturas, carpinterías, y el resto de revestimientos. En el mantenimiento nos tendremos que preocupar básicamente de estos elementos y del cuidado de la jardinería (riego, corte y poda). En la Tabla 5.18 se puede ver un pequeño extracto de las mediciones aplicadas a mantenimiento. Con este modelo es posible variar tanto las cantidades de cada elemento constructivo como la frecuencia con la que se realizan las tareas de mantenimiento. La tabla al completo con la medición para el estudio de caso de esta tesis se puede consultar en el Anexo C.2.

Tabla 5.18: Extracto de mediciones aplicadas al mantenimiento de elementos constructivos del edificio

	Elemento	Material	Cant.	UD	Tarea	Frec. (años)
CARPINTERÍAS	Puerta ppal.	Madera	1,00	u	Mant. cerradura	5
			11,51	m^2	Rebarnizado puerta	7
					Renov. cerradura	10
					Repar. puerta	10
	Puerta ext.	Acero	10,00	u	Mant. cerradura	5
			25,15	m^2	Sust. cerradura	10
					Repar. puerta	15
					Renovación	75
	Puerta paso	Mad. pintar	256,00	u	Repintado puerta	4
			486,40	m^2	Mant. mecanismo	5
					Sust. mecanismo	10
					Renovación	30
Puerta armario	Mad. barnizar	137,00	u	Rebarnizado	4	
		228,04	m^2	Renovación	30	

Por el contrario, en la medición de limpieza no es posible transferir datos de la medición de la fase de construcción, sino que se debe contabilizar el número de salas o estancias clasificadas por tipos y tamaños. Las tipologías de salas van a determinar la periodicidad de las tareas de limpieza, así como los elementos y cantidades de éstos que es necesario limpiar. En la Tabla 5.19 se muestra un extracto de la medición de limpieza por tipo de estancia, tarea y frecuencia. De nuevo, las tablas completas de medición se pueden consultar en el Anexo C.1.

Para cuantificar los recursos necesarios para estas tareas, las anteriores mediciones enlazan con otras tablas de cálculo más complejas. En ellas se descomponen los Precios Unitarios hasta el nivel de Precios Básicos y se calculan las

Tabla 5.19: Extracto de mediciones aplicadas a la limpieza de las estancias del edificio

	Estancia	Tamaño	Cant.	Tarea	Frec.
ASEOS Y BAÑOS	Baño (dom.)	5-8 m ²	1	Barr., freg., aparatos, bañera y espejo Pared, puerta y puntos de luz	Semanal Mensual
	Aseo (públ.)	3-6 m ²	2	Barr., freg., papelera, aparatos y espejo Pared, puerta y puntos de luz	Diaria Trimestral
	Núcleo servicios	15-30 m ²	4	Barr., freg., papeleras y aparatos Espejos y puertas Ventanas Pared y puntos de luz	3 veces al día Diaria Mensual Trimestral
	Sala duchas	15-30 m ²	2	Barr., freg. y duchas Espejos y puertas Ventanas Pared y puntos de luz	3 veces al día Diaria Mensual Trimestral

cantidades consumidas durante toda la vida útil del edificio. Esto se consigue combinando la cantidad de cada recurso dentro del precio con la medición del elemento o estancia afectado y el número de repeticiones de la tarea a la que se refiere el precio. Al conjunto de estas tablas nos referiremos en adelante como Banco de Cuantificación de Recursos (BCRR). En la Tabla 5.20 se muestra un ejemplo de un PUC de mantenimiento desglosado en el BCRR. En las celdas de la parte superior derecha se encuentran los dos datos a los que nos referíamos antes. La cantidad está directamente tomada de la medición, mientras que el número de repeticiones se calcula según la ecuación 5.1. Por medio de este desglose se cuantifica la mano de obra, materiales y maquinaria necesarios para llevar a cabo los trabajos de mantenimiento y limpieza. A partir de estos datos se debe calcular la Huella Ecológica que supone cada tarea, y finalmente el conjunto de todas ellas. El desglose de todos los precios utilizados en esta tesis con su aplicación a la medición del estudio de caso se pueden encontrar en el Anexo D.

$$N_{rep} = \lceil VU_{ed}/F_t \rceil - 1 \quad (5.1)$$

donde:

N_{rep} : Número de repeticiones de la tarea.

VU_{ed} : Vida útil estimada del edificio (años).

F_t : Frecuencia de realización de la tarea (años/repetición).

$\lceil \rceil$: Redondeo al entero inmediatamente superior.

Tabla 5.20: Ejemplo de Precio Unitario Complejo desdoblado en el BCRR

20RPN87501	m2	RENOV. DE GUARNECIDO Y ENLUC. MAESTR. YESO EN PAREDES	PA	PUS	PUC	Cantidad	11209,26	Repet.	1,00
CÓDIGO	UD	DESCRIPCIÓN				TOTAL EDIF.	TOTAL VIDA	PRECIO	COSTE VIDA
20RPN87501	m2	RENOV. DE GUARNECIDO Y ENLUC. MAESTR. YESO EN PAREDES			1,000	11209,259	11209,259	11,94	133873,83
01RCCG90001	m2	DEMOL. SELECTIVA M. MAN. GUARNECIDO Y ENLUC. YESO PAREDES			1,000	11209,259	11209,259	3,28	36801,57
TP000100	h	MANO DE OBRA PEÓN ESPECIAL MATERIALES			0,180	2017,667	2017,667	18,24	36801,57
		MAQUINARIA							
10CGG000008	m2	GUARNECIDO Y ENLUCIDO MAESTREADO EN PAREDES, YESO			1,000	11209,259	11209,259	8,66	97072,25
TO01200	h	MANO DE OBRA OF. 1ª YESERO MATERIALES			0,300	3362,778	3362,778	21,86	73510,30
AGY00100	m3	PASTA DE YESO NEGRO YG	1,000	0,015	0,015	168,139	168,139	104,16	17513,13
TP000100	h	PEÓN ESPECIAL	3,000	0,045	0,045	504,417	504,417	18,24	9200,39
GW00100	m3	AGUA POTABLE	0,618	0,009	0,009	103,910	103,910	0,55	57,15
GY00200	t	YESO NEGRO YG	0,876	0,013	0,013	147,290	147,290	56,05	8255,59
AGY00200	m3	PASTA DE YESO BLANCO YF	1,000	0,005	0,005	56,046	56,046	107,93	6048,82
TP000100	h	PEÓN ESPECIAL	3,000	0,015	0,015	168,139	168,139	18,24	6048,82
GW00100	m3	AGUA POTABLE	0,618	0,003	0,003	34,637	34,637	0,55	19,05
GY00100	t	YESO BLANCO YF	0,876	0,004	0,004	49,097	49,097	60,35	2962,98
		MAQUINARIA							
13IPP00001	m2	PINTURA PLÁSTICA LISA SOBRE LADRILLO, YESO O CEMENTO			1,000	11209,259	11209,259	4,26	47778,34
TO01000	h	MANO DE OBRA OF. 1ª PINTOR MATERIALES			0,090	1008,833	1008,833	21,86	22053,09
PP000100	kg	PINTURA PLÁSTICA			0,450	5044,167	5044,167	1,70	22053,09
PW000300	kg	SELLADORA			0,350	3923,241	3923,241	4,20	16477,61
WW000400	u	PEQUEÑO MATERIAL MAQUINARIA			0,200	2241,852	2241,852	0,30	672,56

5.5. Modelo de cálculo de Huella Ecológica

Desde la aparición del concepto de Huella Ecológica [25] (HE) se han publicado numerosas críticas al modelo, y con ellas, las correspondientes propuestas para solucionar las debilidades del indicador. En la actualidad, la Global Footprint Network (en adelante GFN) es el organismo encargado de fijar la metodología general de cálculo, así como de aplicar las modificaciones que consideren oportunas en las revisiones periódicas del indicador. En el desarrollo de este estudio ninguna propuesta de modificación se tendrá en cuenta por motivos prácticos. Lo que se pretende es definir un modelo de cálculo de utilidad en cualquier edificio de cualquier país, por lo que aplicar una modificación por decisión propia supondría calcular el impacto de manera distinta a como lo haría el resto del mundo.

Para aquellos investigadores interesados en indagar en dichas propuestas de modificación, a continuación se mencionan algunas de las que han tenido un mayor impacto y consideración entre la comunidad científica dedicada al diseño y revisión del indicador:

- van den Bergh y Verbruggen [66] critican la falta de distinción entre uso sostenible o no sostenible del terreno, argumentando que una explotación intensiva del mismo puede aumentar la productividad a cambio de degradar su calidad para futuras generaciones.
- En atención a la anterior crítica, Lenzen y Murray [63] dividen el terreno en zonas de uso intensivo y zonas de uso extensivo, divididos ambos en varios tipos de terreno según la tenencia y clase de vegetación. A cada uno de ellos se le asigna un índice de perturbación o degradación y se calcula la HE expresada como terreno real perturbado. Esto, como vemos, supone un cambio de gran envergadura que modificaría por completo el indicador, y por tanto no es posible aplicarlo conservando la simplicidad de la metodología original.
- Haberl *et al.* [81] puntualizan que la HE excluye las superficies de terreno poco o nada productivo para el ser humano, como pueden ser terrenos helados o desérticos. Esto está en parte justificado porque pocos asentamientos humanos se sitúan en entornos no productivos, sino en áreas donde las condiciones ambientales como el clima y la disponibilidad de agua favorecen la actividad humana. Sólo las sociedades industriales, basadas en el uso de combustibles fósiles, pueden permitirse energéticamente mantener asentamientos en ecosistemas con baja productividad.
- Venetoulis y Talberth [83] critican la orientación antropocéntrica de la HE. En su estudio proponen cuatro modificaciones: incluir toda la superficie de la Tierra en la biocapacidad, reservar espacio para las necesidades de otras especies, utilizar la Productividad Primaria Neta como base para los factores de equivalencia, y por último cambiar las hipótesis sobre la asimilación de carbono.

En cualquier caso el método a utilizar será el fijado actualmente por la GFN, cuyos cálculos están basados en datos procedentes de una variedad de

fuentes nacionales e internacionales, entre las que se incluyen la Organización de la Alimentación y la Agricultura de las Naciones Unidas [74], la División de Estadísticas de las Naciones Unidas [121] y la Agencia Internacional de la Energía [122]. A estas cuentas se escapan las transacciones no registradas o que no llegan a entrar a los mercados, como por ejemplo la agricultura en viviendas particulares, tala de árboles para combustión a pequeña escala, etc. Además, los especialistas consideran que se debe hacer un esfuerzo por utilizar datos más ajustados al ámbito de estudio, ya sean nacionales o regionales, como apoyo a las estadísticas internacionales disponibles. De esta manera se consiguen resultados más precisos a la vez que se proporcionan fuentes para futuros análisis [62]. Esto conforma en parte la justificación del presente estudio, en el que desde un punto de vista especializado en el sector de la edificación se diseña un modelo de cálculo que permita obtener resultados más precisos y detallados para la HE del uso y mantenimiento de los edificios.

Visto todo lo anterior, se establece el diagrama general para el modelo de cálculo de HE (Figura 5.11), que representa de manera simplificada el funcionamiento del mismo. El indicador HE convierte fuentes de impacto como el consumo de electricidad, agua, materiales, alimentos o combustible, y la generación de residuos (en rojo), en terreno productivo equivalente necesario para producir o absorber estos impactos. Este terreno productivo puede ser de varios tipos: cultivos, pastos, zonas pesqueras, sumideros de CO₂, bosques, y terreno construido (en azul), y al estar expresados en una unidad común (hectáreas globales) se pueden sumar para obtener un único resultado de HE.

La metodología utilizada está dividida en dos ramas: la de uso, en la que los datos de las distintas fuentes de impacto se obtienen de la información general del edificio, como facturas, simulaciones y planos; y la de mantenimiento y limpieza, donde la información sobre fuentes de impacto procede de las mediciones del proyecto.

Este modelo viene en parte inspirado por el desarrollado por Solís Guzmán [123], que estudió la aplicación del indicador Huella Ecológica a la fase de construcción del edificio. Guarda similitudes con el mismo, sobre todo en la rama de mantenimiento del edificio, ya que se trata de pequeñas obras u operaciones compuestas por mano de obra, maquinaria y materiales. Sin embargo, en el desarrollo interno de los cálculos se van a producir algunas diferencias en cuanto a la metodología y los datos utilizados. En los siguientes apartados se explicarán los cálculos a aplicar para pasar de los datos obtenidos de la información general del edificio y del BCRR a resultados en términos de HE.

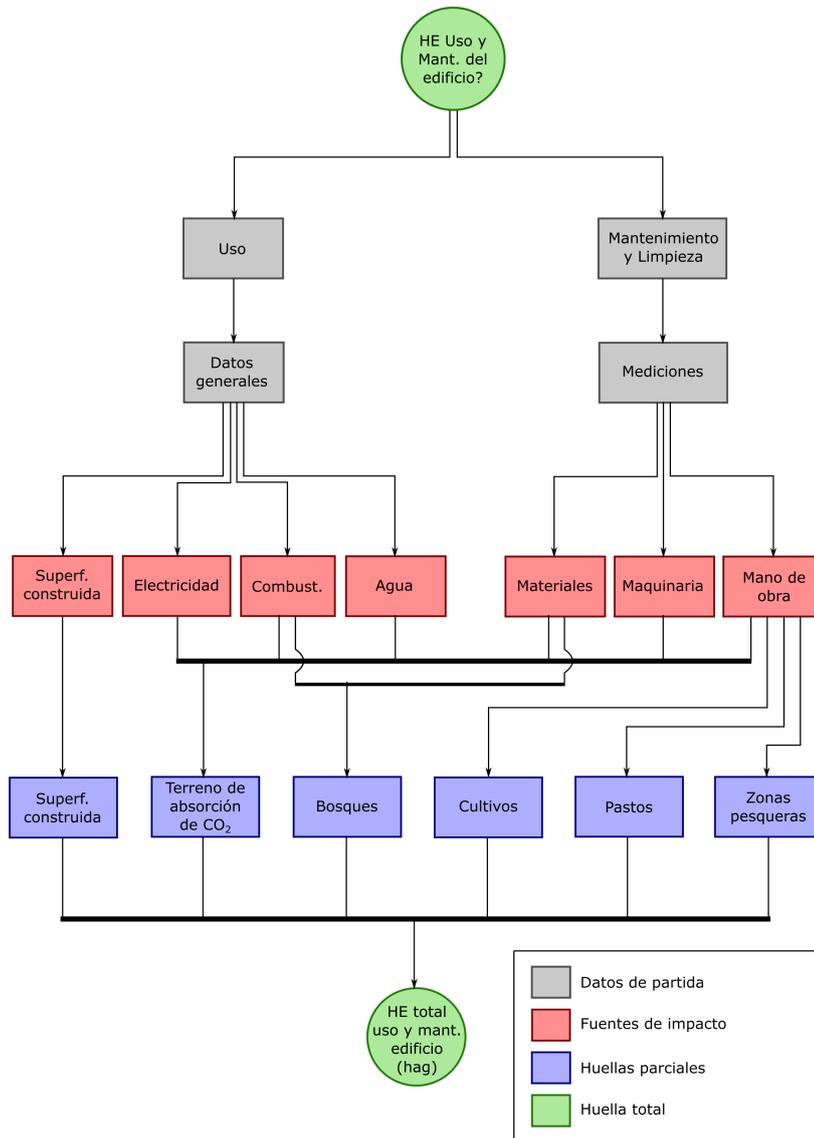


Figura 5.11: Diagrama de flujos general del modelo de cálculo de HE

5.5.1. Superficie construida

En realidad, la HE de superficie ocupada por el edificio se produce en la fase de construcción, no en la de uso del edificio. No obstante, esta es una huella que se mantiene con un valor constante durante toda la vida útil del edificio sin ser por ello acumulativa. Para calcularla se determina la superficie en hectáreas teniendo en cuenta el área completa de parcela, y se transforma en hectáreas globales utilizando la ecuación 5.2.

$$HE_{sup} = S \cdot FEQ_{inf} \quad (5.2)$$

donde:

HE_{sup} : HE parcial de superficie construida (hag/año)

S : Superficie ocupada por la parcela (ham/año)

FEQ_{inf} : Factor de equivalencia de infraestructuras (2,51 hag/ham) [124]

En el cálculo de la HE de superficie construida se asume que las ciudades están construidas generalmente sobre terreno apropiado para el cultivo [25], y por ello el factor de equivalencia utilizado, el de terreno de infraestructuras, es igual al de cultivos. Esto se hace así siempre que no se tenga evidencia de que en realidad la ciudad está construida sobre otro tipo de terreno productivo, como ya se explicó en la Sección 5.1.

5.5.2. Electricidad

El ahorro de energía durante la fase de uso de los edificios ha sido abordado en numerosas ocasiones, ya sea con una iluminación y equipamientos más eficientes energéticamente, el uso de aislamiento, arquitectura pasiva, ventilación nocturna, materiales de cambio de fase, controles y acristalamiento inteligentes, etc. Sin embargo, al tratarse de opciones de carácter tecnológico, son los humanos los que deben operar con ellas, y el componente de fallo humano hace que el comportamiento de los ocupantes sea el eslabón débil del sistema de ahorro energético [125].

Respecto a este tema, existen estudios de todo tipo. Se ha estudiado cómo los ocupantes reaccionan a distintos niveles de iluminación, cómo afecta la posición de los interruptores en el patrón de comportamiento de los trabajadores en edificios de oficinas [126], incluso el tiempo (más del 50 % de su jornada laboral) que los trabajadores pasan fuera de su puesto de trabajo aunque su ordenador y luz continúen encendidos [127].

El consumo de electricidad por parte de los usuarios se obtiene bien de las facturas de la compañía de suministro de electricidad en el caso de edificios existentes, o bien de simulaciones energéticas en fase de proyecto. Algunos autores [48] consideran que esta segunda opción es preferible, ya que elimina las distorsiones por la variación de las estaciones o condiciones climáticas irregulares, comportamientos irregulares de los ocupantes, o errores en la calibración

de aparatos de acondicionamiento, además de permitir simulaciones teóricas modificando las condiciones de la envolvente y otros elementos del edificio.

En los programas de simulación energética de edificios también se especifican las cargas internas de calor, como pueden ser la iluminación, instalaciones de agua caliente, ordenadores y otros electrodomésticos que con su funcionamiento se convierten en fuentes de calor que disminuyen la necesidad de calefacción en invierno. Lo mismo ocurre con el número de ocupantes de los distintos espacios, ya que un adulto puede irradiar aproximadamente 100 vatios, suponiendo esto una ganancia de temperatura en la sala [49]. En cambio, la simulación del consumo eléctrico de los electrodomésticos presentes en los diferentes espacios no tiene porqué corresponderse con la realidad, y en este caso los datos reales de facturación y consumos durante periodos de considerable duración podrían ser más fiables que una simulación teórica basada en suposiciones.

Hay que tener en cuenta entonces que los datos procedentes de facturas se obtienen para un año concreto o quizás para un periodo de varios años del que se obtiene una media, y este valor no tiene por qué ser constante durante todos los años de uso del edificio. No obstante, no queda otra posibilidad que asumir como hipótesis que este dato no vaya a sufrir grandes variaciones a lo largo del tiempo. Sí que es importante en este caso que los datos pertenezcan a ciclos de años completos, de modo que abarquen tanto la estación de invierno como la de verano, que son en las que se producen picos debido al uso de calefacción y aire acondicionado.

En edificios existentes para los que este dato procede de facturas, los consumos de electricidad asociados a las obras de renovación de elementos del edificio probablemente no estén incluidos en los datos reales de consumo procedentes de facturas. Dependiendo de la frecuencia de estas renovaciones, sería mucha casualidad que el año del que se estudia el consumo de electricidad fuera el mismo en el que se ha llevado a cabo la renovación de puertas, pintura, revestimientos, etc. Todos esos consumos, que dependen del tipo de pequeña maquinaria utilizada para dichas obras de reforma y mantenimiento, serán pues estimados y contemplados en la sección de maquinaria correspondiente a la rama de mantenimiento.

En anteriores modelos orientados a la fase de construcción [57, 59] el consumo de electricidad se estimaba mediante ecuaciones polinómicas, y su huella se obtenía utilizando la productividad del petróleo como factor de conversión de gigajulios (GJ) a hectáreas (ham). Utilizar la productividad del petróleo de manera genérica para la energía eléctrica significa asumir que el mix energético está compuesto por combustibles fósiles y energía nuclear, asimilando su poder contaminante al del petróleo, y por energías renovables, descontando su porcentaje correspondiente en el mix, con lo que se asume que, al tratarse de energías limpias, sus emisiones son nulas. Se ha llegado a la determinación de que este método no es del todo exacto, y por tanto en el presente modelo se proponen varias modificaciones para el cálculo de la HE de la electricidad.

La HE del consumo de electricidad se obtiene utilizando dos factores intermedios. El primero es el factor de emisión de la electricidad, que depende del mix energético del país donde está situado el edificio (Figura 5.12). Además, la

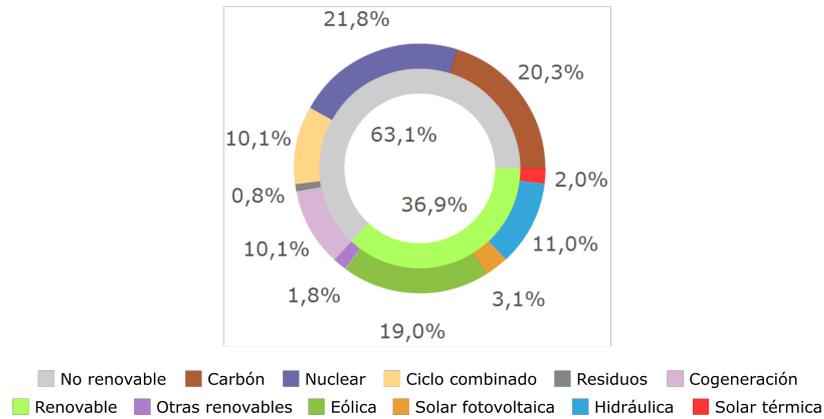


Figura 5.12: Mix energético de la electricidad en España en 2015. Fuente: Red Eléctrica de España (2016)

energía eléctrica se mide normalmente en el punto de entrada al edificio, pero esta lectura, que se podría llamar energía entregada o secundaria, no representa el total de energía realmente utilizada. Una cantidad considerable de energía es necesaria para producir esa energía entregada, y esta relación energía primaria-secundaria varía según la fuente utilizada inicialmente para producirla (carbón, hidroeléctrica, solar...). De este modo, el consumo energético debería ser medido en energía primaria, la energía requerida procedente de la naturaleza e incorporada en la que utiliza el consumidor, ya que ésta está directamente relacionada con las emisiones de CO₂ [50]. En España, el factor de emisión aplicado por Red Eléctrica de España [128] y que ya contempla esas pérdidas es de 0,00248 tCO₂/kWh.

El segundo es el factor de absorción de CO₂ de los bosques [124]. Además, en la ecuación 5.3 para el cálculo de esta huella parcial, se aplica una reducción de las emisiones debido a la absorción de carbono en los océanos, el cual, de acuerdo a Borucke *et al.* [64] se obtiene dividiendo la absorción en océanos calculada por Khatiwala *et al.* [73] por las emisiones antropogénicas de carbono (ambas medidas en Pg C/año) de Marland *et al.* [72]. El resultado varía entre un 28 % y un 35 % en el periodo de 1961 a 2008, tomando el primero como valor más conservador. Por último se aplica el factor de equivalencia del terreno para la absorción de carbono. Este factor de equivalencia es igual al del terreno de bosques, ya que la metodología del indicador contempla dos papeles distintos para los bosques: la absorción de CO₂ y la producción de madera.

$$HE_{el} = C_{el} \cdot E_{el} \cdot (1 - A_{oc}) / A_{bo} \cdot FEQ_{ca} \quad (5.3)$$

donde:

HE_{el} : HE parcial del consumo de electricidad (hag/año)

C_{el} : Consumo anual de electricidad (kWh/año)

E_{el} : Factor de emisión de la electricidad (0,000248 tCO₂/kWh) [128]

A_{oc} : Porcentaje de absorción de CO₂ en los océanos (0,28) [64]

A_{bo} : Factor de absorción de los bosques (3,59 tCO₂/ham) [124]

FEQ_{ca} : Factor de equivalencia de absorción de carbono (1,26 hag/ham) [124]

5.5.3. Combustibles

En los edificios se utilizan combustibles fósiles como fuente de energía calorífica para calentar agua o para calefactar los espacios. En principio, los combustibles más utilizados serán el gas butano y el gas natural, aunque dependiendo del tipo de instalación es posible que haya calderas de gasoil u otros sistemas.

El impacto del consumo de combustible para calefacción o agua caliente sanitaria (ACS) se calcula de modo similar al de la electricidad. Dado que es posible que tengamos que calcular el impacto por el uso de varios combustibles, el cálculo de la HE comenzará con un sumatorio de i elementos, en el que cada i es un tipo de combustible. Así, para cada i se debe determinar el consumo medio anual y multiplicar por el factor de emisión correspondiente, con lo que se obtienen las emisiones totales provocadas por los combustibles.

Según datos del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) [129], los factores de emisión de los distintos combustibles son los que se muestran en la Tabla 5.21.

Tabla 5.21: Factores de emisión de CO₂ de los combustibles fósiles. Fuente: IDAE (2011)

Combustible	Unidad	Fact. Emisión (tCO ₂ /u)
Hulla	t	2,104
Lignito negro	t	1,325
Carbón para coque	t	3,304
Biomasa agrícola	t	Neutral
Biomasa industria forestal	t	Neutral
Coque de petróleo	t	3,194
Gas de coquerías	t	1,676
Gasóleo C	l	0,0028
Fuelóleo	l	0,0028
Gas natural	Nm ³	0,0026
GLP	l	0,0015
Butano	l	0,0016
Propano	l	0,0015
Gas de refinería	t	2,706

Al igual que con la energía eléctrica, los últimos pasos consisten en deducir el porcentaje de absorción por parte de los océanos, multiplicar por el factor de absorción de los bosques, y finalmente convertir estas hectáreas de bosque a hectáreas globales de HE mediante el factor de equivalencia de absorción de carbono, de modo que el cálculo quedaría como se ve en la ecuación 5.4.

$$HE_{co} = \sum_i (C_i \cdot E_i) \cdot (1 - A_{oc}) / A_{bo} \cdot FEQ_{ca} \quad (5.4)$$

donde:

HE_{co} : HE parcial del consumo de combustibles (hag/año)

C_i : Consumo medio anual del combustible i (kWh, l, o m^3 /año)

E_i : Factor de emisión del combustible i (tCO_2 /kWh, l, o m^3)

A_{oc} : Porcentaje de absorción de CO_2 en los océanos (0,28) [64]

A_{bo} : Factor de absorción de los bosques (3,59 tCO_2 /ham) [124]

FEQ_{ca} : Factor de equivalencia de absorción de carbono (1,26 hag/ham) [124]

En la Tabla 5.21 los combustibles de biomasa tienen un factor de emisión neutral. En esos casos su impacto se transforma en HE de bosques a través de la ecuación 5.5. Las bajas productividades utilizadas en la metodología de la GFN para el combustible de madera, así como para los materiales de madera, conduce a una HE de bosques elevada, incluso comparable a la huella de carbono, de la que se sabe que normalmente controla la HE total de los edificios.

$$HE_{ml} = C_{ml} / P_{ml} \cdot FEQ_{bo} \quad (5.5)$$

donde:

HE_{ml} : HE parcial del consumo de madera para leña (hag/año)

C_{ml} : Consumo medio anual de leña (m^3 /año)

P_{ml} : Productividad de leña (3,35 m^3 /ham) [124]

FEQ_{bo} : Factor de equivalencia de bosques (1,26 hag/ham) [124]

5.5.4. Agua

El consumo de agua no está generalmente incluido como tal en las metodologías del indicador HE, pero dado que el estudio que nos ocupa trata de la fase de uso y mantenimiento de edificios, este tipo de consumo cobra una gran importancia.

Éste se puede producir con varias finalidades. Por un lado tenemos el consumo doméstico por parte de los usuarios del edificio, pero también se debe tener presente que el edificio en cuestión puede formar parte de una urbanización donde haya otros servicios como una piscina, jardines que requieren de agua para riego, etc. Al contrario que ocurría con la electricidad, los consumos de agua para limpieza del edificio y otras operaciones habituales estarán probablemente incluidos en los datos de consumo real obtenidos de las facturas. Por tanto, los consumos de agua estimados para las tareas de limpieza deben ser descontados del dato de factura para evitar una duplicidad en los cálculos.

La HE del consumo de agua se asignaba en modelos anteriores [57, 59] a la categoría de terreno de bosques, para lo cual se consideraba que la capacidad de los bosques para producir agua es aproximadamente de 1.500 m³/ham/año [130]. Sin embargo, esta hipótesis no está reconocida en la metodología oficial del indicador [64], en el que la categoría de bosques se dedica específicamente a los impactos generados por la leña y los productos de madera. Una solución a este problema sería añadir un nuevo tipo de área productiva para el agua dulce, de donde se reservara un porcentaje prudente de la producción total para el consumo humano.

Dado que esta solución aún no se ha dado, en este modelo el consumo de agua se computa como la energía necesaria para traerla al punto de consumo, incluyendo los tratamientos previos y posteriores a su uso, tal como se especifica en la norma UNE-EN 15978:2012 [86]. En los consumos de factura aparecerán especificados tres conceptos distintos y variables en función del volumen consumido: uno por abastecimiento de agua, otro por depuración y otro por vertido. Estas operaciones tienen un consumo de energía asociado para llevarlas a cabo. Según un informe de sostenibilidad de la empresa de suministro de agua de Sevilla [131], la energía consumida por unidad de volumen es de 0,05 kWh/m³ para el abastecimiento, 0,07 para la potabilización y 0,32 para la depuración de aguas residuales. De estos tres datos, los dos primeros afectan al concepto de abastecimiento de agua, y el segundo afecta a los conceptos de depuración y vertido que veíamos en la factura. Sin embargo, como los tres conceptos van en función del volumen consumido o suministrado, el dato de intensidad energética del agua en este caso sería de 0,44 kWh/m³.

El método de cálculo para la HE del consumo de agua queda definido en la ecuación 5.6, donde se asume que la energía necesaria para todo el proceso es eléctrica.

$$HE_{ag} = C_{ag} \cdot IE_{ag} \cdot E_{el} \cdot (1 - A_{oc})/A_{bo} \cdot FEQ_{ca} \quad (5.6)$$

donde:

HE_{ag} : HE parcial del consumo de agua (hag/año)

C_{ag} : Consumo medio anual de agua (m³/año)

IE_{ag} : Intensidad energética del agua (0,44 kWh/m³) [131]

E_{el} : Factor de emisión de la electricidad (0,000248 tCO₂/kWh) [128]

A_{oc} : Porcentaje de absorción de CO₂ en los océanos (0,28) [64]

A_{bo} : Factor de absorción de los bosques (3,59 tCO₂/ham) [124]

FEQ_{ca} : Factor de equivalencia de absorción de carbono (1,26 hag/ham) [124]

Con esto se completa el cálculo de todos los impactos relativos a la rama de uso o explotación del edificio y comienza la rama de mantenimiento y limpieza.

5.5.5. Materiales

La segunda rama establecida en el diagrama metodológico (Figura 5.11) comienza con el consumo de materiales. Como se mencionó anteriormente, los datos necesarios para esta rama del modelo de cálculo proceden de las mediciones del proyecto. A partir de éstas y mediante el BCRR es posible cuantificar los materiales, maquinaria y mano de obra necesarios para llevar a cabo las tareas.

El consumo de materiales implica un impacto ambiental debido a tres aspectos diferentes: fabricación, transporte y residuos. Para el análisis de las tareas de limpieza y mantenimiento, los materiales empleados son, además de los contenidos en el carro de limpieza o los maletines de herramientas, y todos los que sean necesarios para la renovación de revestimientos, carpinterías e instalaciones.

La HE de la fabricación de los materiales se calcula según la ecuación 5.7, en la que la medición de las cantidades utilizadas de cada material (en la unidad que corresponda) se multiplica por el factor de emisión correspondiente, para terminar convirtiéndolo a HE de carbono con los mismos pasos explicados hasta ahora.

$$HE_{ma} = \sum_i (C_{ma_i} \cdot E_{ma_i}) \cdot (1 - A_{oc}) / A_{bo} \cdot FEQ_{ca} \quad (5.7)$$

donde:

HE_{ma} : HE parcial de la fabricación de materiales (hag/año)

C_{ma_i} : Consumo anual de material i (u/año)

E_{ma_i} : Factor de emisión del material i (tCO₂/u)

A_{oc} : Porcentaje de absorción de CO₂ en los océanos (0,28) [64]

A_{bo} : Factor de absorción de los bosques (3,59 tCO₂/ham) [124]

FEQ_{ca} : Factor de equivalencia de absorción de carbono (1,26 hag/ham) [124]

Al igual que en los cálculos del contenido del carro de limpieza y de los maletines de herramientas, los factores de emisión utilizados para los materiales de construcción proceden de la base de datos Ecoinvent [113]. Además, para aquellos hechos de madera se debe usar la ecuación 5.8 ya que causan una HE de bosques. Es importante puntualizar que aunque se utilizan dos categorías de terreno productivo para las emisiones y la madera, dado que la mayor parte de la absorción de CO₂ ocurre en los bosques, el terreno para absorción de CO₂ se considera una subcategoría del terreno de bosques [64]. Se pueden encontrar discusiones en profundidad sobre este tema en publicaciones de diversos autores [63, 66, 70].

$$HE_{mad} = \sum_i (C_{mad_i} / P_{mad_i}) \cdot FEQ_{bo} \quad (5.8)$$

donde:

HE_{mad} : HE parcial de la producción de madera (hag/año)

C_{mad_i} : Consumo anual del material de madera i (t o m³/año)

P_{mad_i} : Productividad del material de madera i (t o m³/ham) [124]

FEQ_{bo} : Factor de equivalencia de bosques (1,26 hag/ham) [124]

Adicionalmente hay que contabilizar el impacto debido al transporte de los materiales desde la fábrica al edificio. Las bases de datos de ACV utilizan un método de análisis “de la cuna a la puerta”, es decir, desde la extracción de materias primas hasta que el producto final está listo para ser repartido. Por tanto, dichos análisis no incluyen el transporte. Este planteamiento es lógico si se tiene en cuenta que fijar una hipótesis de distancia recorrida y medio de transporte utilizado sin adaptarlo a cada caso puede producir un error de cálculo considerable. Para el cálculo de la HE del transporte de materiales, en este estudio se fijan las siguientes hipótesis:

- Factor de emisión del combustible: según Tabla 5.22
- Tipo de combustible: Diesel
- Limpieza:
 - Se hace una sola compra general de productos de limpieza al año
 - Distancia media de la fábrica al edificio (ida y vuelta): 30 km
 - Vehículo de transporte:
 - Carga máxima: 2,1 t
 - Consumo de combustible: 7,9 l/100 km
- Mantenimiento:
 - Cada partida se considera una obra independiente
 - No se considera transporte para los maletines de herramientas, pequeño material, o material especial y piezas complementarias
 - Distancia media (ida y vuelta): 200 km
 - Vehículo de transporte:
 - Carga > 2,1 t:
 - ◇ Carga máxima vehículo: 24 t
 - ◇ Consumo de combustible: 26 l/100 km
 - Carga ≤ 2,1 t:
 - ◇ Carga máxima vehículo: 2,1 t
 - ◇ Consumo de combustible: 7,9 l/100 km

Dado que las tareas de mantenimiento ocurren en momentos distintos del ciclo de vida del edificio, el peso de cada material consumido durante toda la vida útil del edificio no se puede acumular al final para contabilizar el número de viajes necesarios. De este modo, el cálculo más aproximado (ecuación 5.9)

Tabla 5.22: Factor de emisión de combustible para transporte y maquinaria. Fuente: IDAE (2011)

Combustible	Unidad	Fact. Emisión (tCO ₂ /u)
Gasolina	l	0,0022
Diesel A y B	l	0,0026
Gas natural	Nm ³	0,0026
Biodiesel	l	Neutral
Bioetanol	l	Neutral
GLP	l	0,0015
Queroseno	l	0,0025

se consigue asumiendo que cada tarea o partida supone al menos un viaje para transportar materiales, siempre que sean necesarios.

$$HE_{tr} = \sum_i \left(\frac{C_{mai} \cdot P_{mai}}{C_{car}} \cdot D_{mai} \right) \cdot C_{veh} \cdot E_{co} \cdot (1 - A_{oc}) / A_{bo} \cdot FEQ_{ca} \quad (5.9)$$

donde:

HE_{tr} : HE parcial de la producción de madera (hag/año)

C_{mai} : Consumo anual del material i (u/año)

P_{mai} : Peso del material i (t/u) [124]

C_{car} : Capacidad de carga del vehículo (t)

D_{mai} : Distancia media para el material i (ida y vuelta) (km)

C_{veh} : Consumo del vehículo (l/100 km)

E_{co} : Factor de emisión del combustible (tCO₂/l) (Tabla 5.22)

A_{oc} : Porcentaje de absorción de CO₂ en los océanos (0,28) [64]

A_{bo} : Factor de absorción de los bosques (3,59 tCO₂/ham) [124]

FEQ_{ca} : Factor de equivalencia de absorción de carbono (1,26 hag/ham) [124]

Por último queda contabilizar los residuos generados. En contraste a la fase de construcción, durante esta fase los residuos se producen debido a tareas de limpieza, mantenimiento o reformas. Según el Real Decreto 105/2008 [132], por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición, los residuos generados en obra menor de construcción o reparación domiciliaria se tratan como RSU, y debe gestionarlos la empresa local correspondiente. En esta categoría, y siempre según el mencionado Real Decreto, quedan incluidas:

“obras de construcción o demolición en un domicilio particular, comercio, oficina o inmueble del sector servicios, de sencilla técnica

y escasa entidad constructiva y económica, que no suponga alteración del volumen, del uso, de las instalaciones de uso común o del número de viviendas y locales, y que no precisa de proyecto firmado por profesionales titulados.”

Al estar las tareas contempladas en este estudio englobadas en dicha definición, todo residuo generado durante la fase de uso y mantenimiento, sin tener en cuenta posibles rehabilitaciones del edificio, se considerará RSU. Por tanto, la HE asociada a dichos residuos se calcula según la ecuación 5.10. Según Almasi y Milios [133], el factor de emisión neto para los RSU en España, teniendo en cuenta los beneficios del reciclaje y la valorización energética, es de 0,244 tCO₂ por tonelada de RSU.

$$HE_{RSU} = \sum_i (C_{ma_i} \cdot G_{ma_i}) \cdot E_{RSU} \cdot (1 - A_{oc}) / A_{bo} \cdot FEQ_{ca} \quad (5.10)$$

donde:

EF_{RSU} : HE parcial de los RSU procedentes de materiales (hag/año)

C_{ma_i} : Cantidad anual utilizada del material i (u/año)

G_{ma_i} : Generación de RSU del material i (t/u)

E_{RSU} : Factor de emisión de los RSU (tCO₂/t) [133]

A_{oc} : Porcentaje de absorción de CO₂ en los océanos (0,28) [64]

A_{bo} : Factor de absorción de los bosques (3,59 tCO₂/ham) [124]

FEQ_{ca} : Factor de equivalencia de absorción de carbono (1,26 hag/ham) [124]

Por otro lado, la generación de RSU por hora procedente de productos de limpieza y herramientas se obtiene de las tablas correspondientes en el Anexo A, asumiendo que el peso completo de una herramienta se convierte en residuo cuando su vida útil termina, mientras que para los productos de limpieza solamente el recipiente se convierte en residuo cuando se vacía. En el caso de los materiales de construcción y los escombros de demolición, se considera que la cantidad que se convierte en residuo a partir de la medición es un 5% más de los materiales utilizados. Esto significa que al tratarse de renovación de revestimientos e instalaciones, la misma cantidad de material que se pone, se está quitando, y a esto se añade un 5% más por las pérdidas o roturas que puedan producirse en el transporte, acopio y ejecución.

5.5.6. Maquinaria

El uso de maquinaria, contabilizado en horas de utilización, produce impacto ambiental debido al uso de energía eléctrica o combustible, dependiendo del tipo de motor de la máquina. En las tareas de limpieza la maquinaria es siempre eléctrica, mientras que en el mantenimiento puede ser de ambos tipos. Para

transformar estas horas de utilización a consumo es necesario utilizar la potencia de los motores, ya estudiada por Freire y Marrero [134]. Una vez determinada la cantidad de electricidad y combustible consumidos, sólo queda aplicar el procedimiento explicado en los apartados 5.5.2 y 5.5.6 respectivamente para obtener la HE del uso de maquinaria.

Además, en la HE de la maquinaria queda también incluida la HE del operador de la misma, contabilizando las mismas horas de utilización y aplicando los procedimientos que se explican en el próximo apartado.

5.5.7. Mano de obra

Para terminar, de la medición se desprenden las necesidades de mano de obra para llevar a cabo la limpieza, mantenimiento y renovaciones. La mano de obra es demasiado significativa en la medición de un proyecto para ignorar el impacto que causa. Se considera en este modelo que la mano de obra engloba dos fuentes de impacto: los alimentos, y los RSU. Aunque en anteriores modelos de cálculo [57, 59] también se tenía en cuenta la movilidad de los trabajadores, la norma UNE-EN 15978:2012 [86] establece que, para la fase de construcción, el transporte de los trabajadores de ida y vuelta a la obra no debe ser incluido, y por tanto aquí se interpreta que tampoco debe ser incluida en la fase de uso y mantenimiento.

Para determinar la HE de los alimentos se considera cuantificar qué incremento se da en su alimentación habitual debido al sobreesfuerzo propio de su trabajo, o bien qué consumo de kilocalorías supone dicho esfuerzo, de modo que se pueda cuantificar la porción de la alimentación diaria realmente imputable al trabajo, tal como hace Domenech Quesada [130] para la HE corporativa. Este planteamiento se basa en la hipótesis de que los alimentos proporcionan la energía necesaria para llevar a cabo el trabajo, convirtiéndose así en el “combustible” de los trabajadores.

El cálculo (ecuación 5.11) cuenta entonces con dos factores importantes: la cuantificación de la HE de la alimentación [135] basada en la metodología y productividades utilizadas por la GFN (Tabla 5.23); y la estimación del incremento metabólico por el trabajo desarrollado con respecto a la actividad habitual en casa según la Tabla 5.24 [136].

$$EF_{al} = \sum_i \frac{H_t}{H_j} \cdot \frac{D_{met} \cdot H_j}{C_c} \cdot \frac{HE_i}{D_a} \quad (5.11)$$

donde:

EF_{al} : HE parcial de los alimentos (hag/año)

H_t : Cantidad total de horas trabajadas (h)

H_j : Duración de la jornada laboral (h)

D_{met} : Diferencia de tasa metabólica según oficio (kcal/h) (Tabla 5.24)

C_c : Consumo calórico diario total de una persona (kcal/día) [74]

HE_i : HE anual de categoría i de los alimentos (hag/año) (Tabla 5.23)

D_a : Días por año (365 días/año)

La relación entre la diferencia de tasa metabólica y el consumo calórico medio de las personas se traduce en el porcentaje de la HE de la dieta diaria que es posible relacionar con el trabajo desarrollado. Para este cálculo se asume una duración de 8 horas para la jornada laboral, 3183 kilocalorías por día y persona para el consumo de alimentos, y una tasa metabólica baja (Tabla 5.24) para la actividad que tendría una persona en casa. Además, los datos de tasa metabólica reflejados en las tablas son válidos para varones de 30 años, 70 kilogramos de peso, y 1,75 metros de altura, por lo que para cálculos de mayor precisión se deberán recalculan dichos valores.

En cuanto a la generación de RSU, en 2013 cada persona en España generó 449 kilogramos de RSU [137]. Si se asume que cada día una persona duerme durante 8 horas (no generando residuos), entonces la cantidad de RSU generados por hora es de 0,077 kg/h. El cálculo de la HE de los RSU generados por los trabajadores (ecuación 5.12) consiste en multiplicar las horas trabajadas por dicha tasa de generación horaria de RSU y el factor de emisión neto para los RSU en España antes mencionado (0,244 tCO₂/tRSU) [133].

$$HE_{RSU} = H_t \cdot G_{RSU} \cdot E_{RSU} \cdot (1 - A_{oc}) / A_f \cdot EQF_{ca} \quad (5.12)$$

donde:

EF_{RSU} : HE parcial de los RSU generados por la mano de obra (hag/año)

H_t : Cantidad anual de horas trabajadas (h/año)

G_{RSU} : Generación horaria de RSU (t/h) [137]

E_{RSU} : Factor de emisión de los RSU (tCO₂/t) [133]

A_{oc} : Porcentaje de absorción de CO₂ en los océanos (0,28) [64]

A_{bo} : Factor de absorción de los bosques (3,59 tCO₂/ham) [124]

FEQ_{ca} : Factor de equivalencia de absorción de carbono (1,26 hag/ham) [124]

Tabla 5.23: Huella Ecológica y calorías del consumo de alimentos. Fuente: González Vallejo *et al.* (2015)

Categoría i	Huella Ecológica i (hag/pers./año)
Cultivos	0,809
Pastos	0,216
Pesca	0,345
Carbono	0,093
Total	1,463

Tabla 5.24: Tasa metabólica en función de la actividad. Fuente: INSHT (2014)

Actividad	Tasa metabólica		Media (kcal/h)
	(W/m ²)	(kcal/h)	
Trabajo sedentario	55 - 70	85,4 - 108,7	97,1
Trabajo administrativo	70 - 100	108,7 - 155,3	132
Albañil	110 - 160	170,8 - 248,5	209,7
Carpintero	110 - 175	170,8 - 271,8	221,3
Cristalero	90 - 125	139,8 - 194,1	166,9
Pintor	100 - 130	155,3 - 201,9	178,6
Herrero	90 - 200	139,8 - 310,6	225,2
Soldador	75 - 125	116,5 - 194,1	155,3
Tornero	75 - 125	116,5 - 194,1	155,3
Fresador	80 - 140	124,2 - 217,4	170,8
Jardinero	115 - 190	178,6 - 295,1	236,8
Tractorista	85 - 110	132 - 170,8	151,4
Operador de grúa	65 - 145	100,9 - 225,2	163,1
Tasa metabólica baja	71 - 130	110,3 - 201,9	155,3
Tasa metabólica moderada	131 - 200	203,4 - 310,6	256,2
Tasa metabólica alta	201 - 260	312,2 - 403,8	357,2

5.6. Costes y HE en escenarios a largo plazo

Una vez definida la metodología de cálculo, la etapa restante consiste en la actualización temporal monetaria y ecológica de los resultados obtenidos.

Tal y como apuntan Riahi *et al.* [138], la longevidad de los edificios nos obliga a afrontar el reto de predecir los cambios en la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero, los avances en las tecnologías de generación de energía, y la aparición de nuevas políticas para mitigar el cambio climático. Lo mismo ocurre con el valor de la moneda, cuya evolución es necesario estimar para poder actualizar los costes que se producen en los distintos años de la vida útil del edificio.

Para la estimación de la tasa de actualización monetaria se parte de los datos de Índice de Precios al Consumo (IPC) disponibles en la base del Instituto Nacional de Estadística para el periodo de 1961 a 2016. Dichos datos se han obtenido con periodicidad anual, y de ellos se extrae la evolución del valor de un euro de 2015 (Figura 5.13, superior izquierda).

En dicha gráfica se aprecia un punto de inflexión, que coincide con el fin del periodo de dictadura en España y el comienzo de la democracia, a partir del cual el valor de la moneda comienza a escalar a un ritmo mayor. Por ello es necesario dividir la estimación de dicho valor en dos periodos distintos. Para el primero, desde 1948 a 1976, se utiliza una regresión por línea de tendencia exponencial (Figura 5.13, superior derecha). El hecho de comenzar desde el año 1948 se debe a circunstancias del estudio de caso de la tesis, aunque esta regresión se podría haber ampliado a años anteriores sin mayor problema. Para el segundo periodo se utiliza una predicción lineal hasta llegar al año 2047, escogido este año final por los mismos motivos anteriores (Figura 5.13, inferior izquierda). Para ambas estimaciones se especifica en las gráficas la fórmula de la línea de tendencia y el R^2 correspondiente.

Finalmente, en la última gráfica (Figura 5.13, inferior derecha), se unen ambas estimaciones para reflejar el periodo completo de los 100 años de vida útil que se le asumen al edificio del estudio de caso de esta tesis.

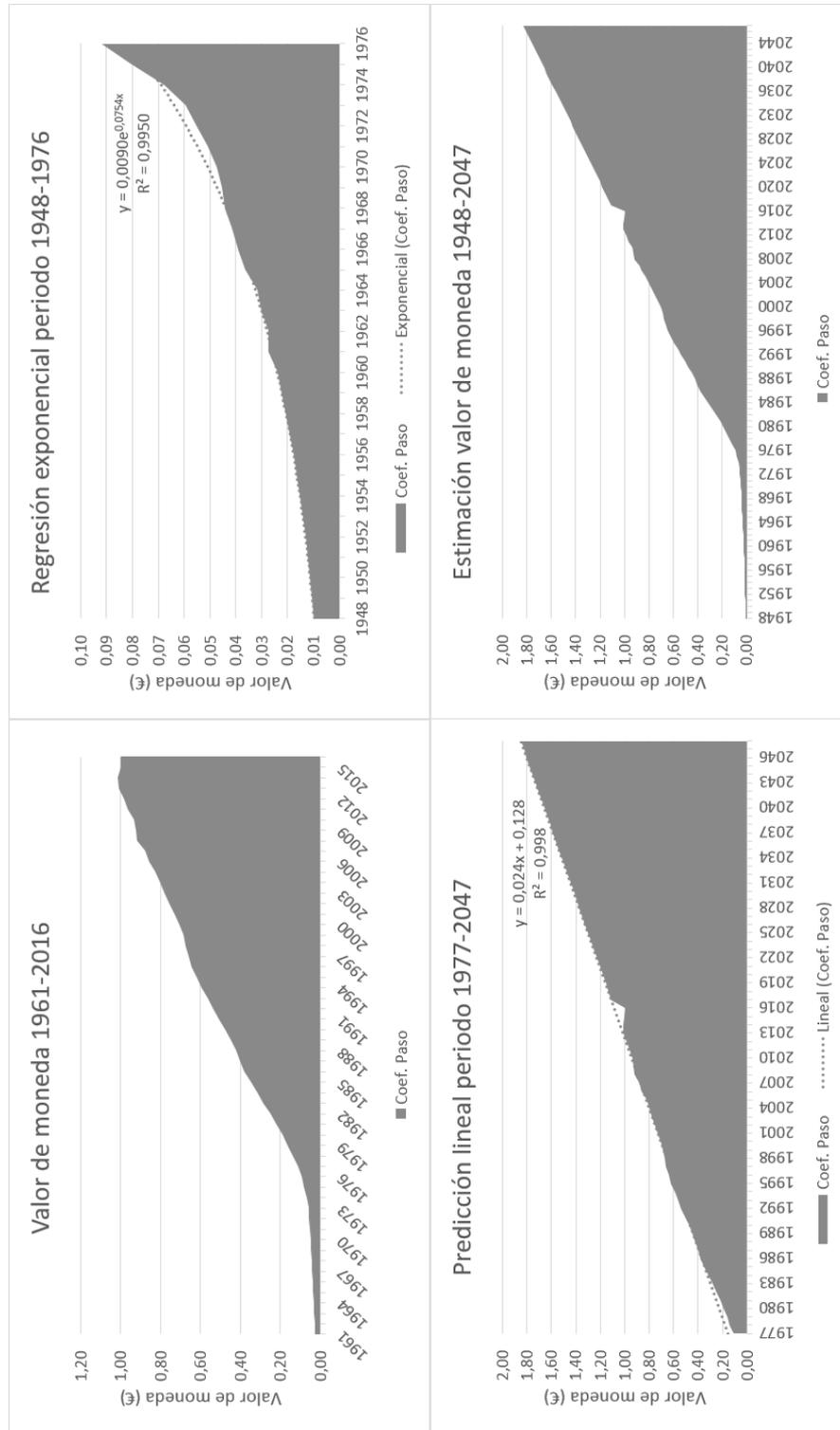


Figura 5.13: Estimación del valor de la moneda en España para el periodo de 1948 a 2047

En lo que se refiere a la HE, en un estudio reciente, Moore *et al.* [139] desarrollan una proyección de la misma hasta 2050 siguiendo varios escenarios. Con el fin de escoger un escenario conservador (a la par que optimista) para este estudio, se utiliza el escenario conocido como BLUE map, de la Agencia Internacional de la Energía (Figura 5.14). En este escenario se asume que para el año 2050, las emisiones se estabilizarán al 50 % de los niveles de 2005. El consumo de alimentos, el crecimiento de la población, y el cambio climático siguen proyecciones hipotéticas de organizaciones internacionales como la FAO, la división demográfica de las Naciones Unidas, o el IPCC.

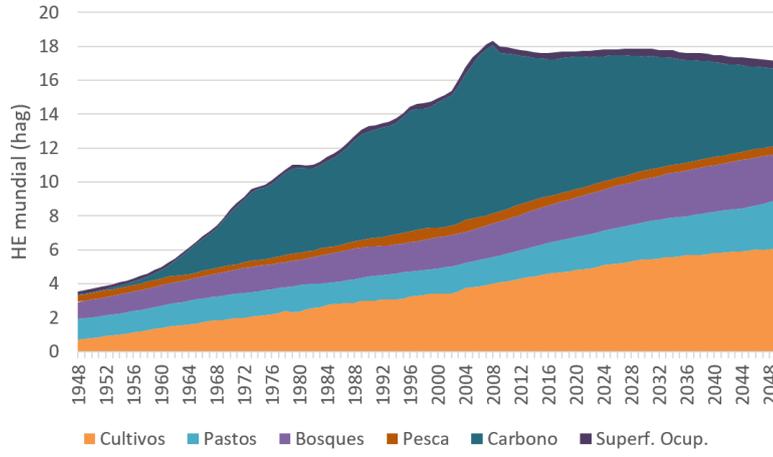


Figura 5.14: Escenario BLUE map de la IEA aplicado a la HE mundial por persona. Fuente: Moore *et al.* (2012)

De este escenario se extraen tasas de reducción para cada una de las seis categorías de HE estableciendo como año base el actual, lo cual permite traducir los impactos causados en otros años a términos de HE actual (ecuación 5.13). Estos factores de conversión reflejan, además de las ya mencionadas hipótesis, las variaciones a lo largo de la historia en las productividades y factores de equivalencia utilizados por la GFN [139].

$$HE_i = HE_{i,b} \cdot \sum_j \frac{HE_{m,i,j}}{HE_{m,i,b}} \quad (5.13)$$

donde:

HE_i : HE de categoría de terreno i durante toda la vida útil del edificio (hag)

$HE_{i,b}$: HE de la categoría i en el año base b (hag)

$HE_{m,i,j}$: HE mundial de la categoría i en el año j (hag)

$HE_{m,i,b}$: HE mundial de la categoría i en el año base b (hag)

Capítulo 6

Estudio de caso

En este capítulo se presenta el estudio de caso escogido con el fin de probar la utilidad de la metodología de cálculo diseñada. Se trata de un edificio situado en el sector sur de Sevilla (España), que fue construido en 1948 para albergar el Colegio Mayor Hernando Colón (CMHC). La parcela ocupa lo que en su día fue la Plaza de los Conquistadores de la Exposición Iberoamericana de 1929, de la que aún se pueden encontrar algunas esculturas dentro de los terrenos del CMHC.



Figura 6.1: Fachadas frontal y trasera del Colegio Mayor Hernando Colón.

Como paso previo al análisis económico y ambiental de la fase de uso y mantenimiento, se describe el mismo en tres bloques de acuerdo a los requisitos de descripción establecidos por la norma UNE-EN 15978:2012 [86]. En primer lugar se describen las características de sus partes constitutivas, entendiendo como tales los elementos o componentes del edificio. A continuación se describen los procesos imputables a la fase estudiada, como son el transporte, el mantenimiento, reparación, sustitución, o la limpieza. Por último, se estudian los consumos en servicio, tanto de energía como de agua.

6.1. Partes constitutivas

El edificio estudiado es una construcción exenta con 7.187 m² de superficie construida, en una parcela de 10.501 m² con espacios ajardinados, aparcamientos, instalaciones deportivas y una piscina. Cuenta con cuatro plantas sobre rasante y una semienterrada, con una altura libre por planta de 3,10 metros, excepto en planta baja, en la que se alcanzan los 5,30 metros en algunas zonas. En planta, el edificio tiene forma de T (Figura 6.2). Las alas izquierda y derecha, junto con el núcleo central, alcanzan la tercera planta, mientras que el ala trasera solamente alcanza la primera.

La planta semisótano se utiliza principalmente como biblioteca, almacenes, salas de máquinas, y un gimnasio. En planta baja hay oficinas en el núcleo central, mientras que el ala izquierda está ocupada por la vivienda del director y el ala derecha por un salón de actos, una sala de reuniones y una capilla. El ala trasera está ocupada por un gran comedor y una cocina industrial. Las tres plantas superiores están exclusivamente dedicadas a los dormitorios de los estudiantes, que ocupan las alas izquierda y derecha, y pueden acoger hasta 139 residentes.

La estructura es de muros de carga de ladrillo macizo sobre cimentación de zapatas corridas de hormigón. Los forjados son unidireccionales. Cierra la parcela un muro de ladrillo tosco de 3 metros de altura con pilastras, excepto en la fachada principal, donde presenta un murete de 0,84 metros de altura continuado con reja metálica entre pilastras de 1,70 metros de altura.

Las ventanas son de carpintería de aluminio anodizado, con balconeras abatibles y el resto correderas, todas ellas con vidrio simple. Tiene una cubierta inclinada de teja árabe cubriendo la tercera planta, mientras que el ala trasera se corona con una cubierta plana transitable sobre planta primera. Tiene tabiquería interior de ladrillo en todas las plantas, excepto en la tercera, donde es de yeso laminado. Los paramentos exteriores están enfoscados y pintados. Excepto en los núcleos de servicios y baños, los tabiques interiores están enlucidos y pintados, con presencia de un zócalo de caliza “rojo Alicante” en algunas zonas.

Las puertas exteriores son de acero, excepto la principal, un portón antiguo de madera de aproximadamente 4 metros de altura. Las puertas de paso interior son normalizadas ligeras de madera en su mayoría, con algunas puertas de acero de protección contra incendios para sectorizar el edificio en caso de emergencia. Cuenta con un núcleo principal de escaleras que comunica la planta semisótano con la tercera planta, otro en el ala izquierda y la derecha uniendo semisótano y planta baja, y otro en el ala trasera del semisótano a la cubierta plana (Figura 6.3). Los suelos son de terrazo en la mayor parte de la superficie. En las zonas comunes de planta baja es de caliza “rojo Alicante”, y en la planta tercera de gres cerámico. Los techos son continuos de yeso laminado, y abovedados en algunas zonas de la planta baja y sótano.

En cuanto a las instalaciones, el edificio cuenta con dos calderas de gasóleo con una potencia útil de 160.000 kcal/h, que se utilizan para Agua Caliente Sanitaria (ACS) y calefacción por radiadores distribuidos por todo el edificio.

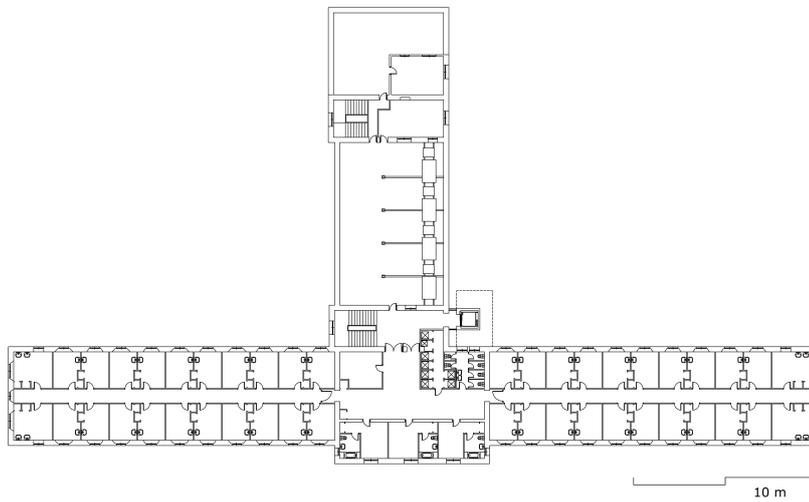


Figura 6.2: Plano de primera planta del Colegio Mayor Hernando Colón.

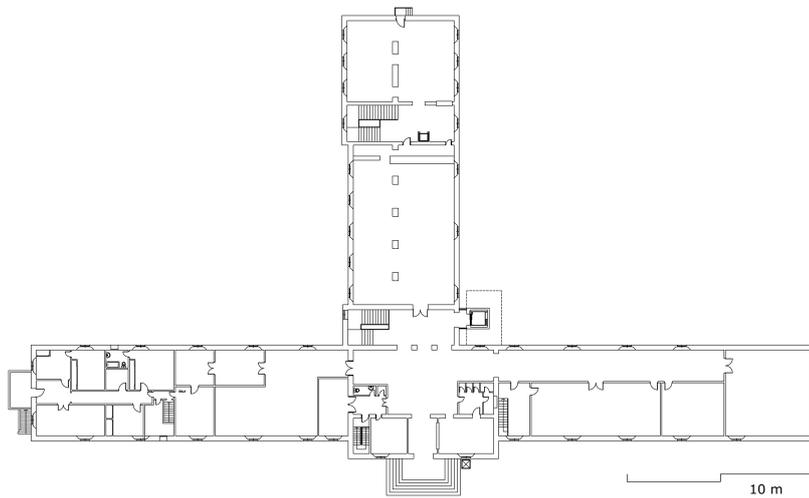


Figura 6.3: Plano de planta baja del Colegio Mayor Hernando Colón.

En la cubierta del ala trasera hay cuatro bombas de calor de 33 kW de potencia frigorífica y 40 kW de capacidad calorífica, las cuales alimentan un sistema de fan coil distribuido por todas las habitaciones. Asimismo, hay un tanque de propano de 1.029 litros de capacidad que alimenta a la cocina. Las tuberías son de acero para los fan coil, y de cobre para el suministro de agua. Los bajantes son originalmente de fibrocemento, y se sustituyen con carácter correctivo a PVC. La iluminación es en su mayoría por luminarias con tubos fluorescentes. Hay un ascensor en la parte trasera del núcleo central. En los exteriores hay farolas, e iluminación especial para las instalaciones deportivas.

6.2. Procesos de la fase de uso y mantenimiento

Como ya se vio en la Sección 5.2, de límites del sistema, los procesos que se consideran imputables a la fase de uso y mantenimiento de los edificios son los siguientes:

- Uso de energía para calefacción, refrigeración, iluminación y ACS
- Uso de agua en servicio
- Limpieza
- Mantenimiento de revestimientos e instalaciones
- Reparación
- Sustitución o renovación
- Jardinería

Las hipótesis tomadas en este estudio en cuanto a frecuencias de limpieza de los distintos elementos contenidos en cada tipo de sala se muestran en la Tabla 6.1, basada en el cuadrante de organización de la Unidad de Limpieza de la Universidad de Sevilla. Hay que tener en cuenta que estas frecuencias se aplican al edificio del estudio de caso de la presente tesis, una residencia universitaria que sigue un perfil de funcionamiento propio de un hotel. En otros estudios dichas frecuencias deberán ser revisadas.

En cuanto a las labores de mantenimiento y renovación periódica, las hipótesis utilizadas para la frecuencia de cada tarea se obtuvieron de la Referencia sobre Costes de Mantenimiento y Reparación en Edificios, de Whitestone Research [109]. Estas periodicidades son orientativas, y normalmente las grandes tareas de renovación relativas a elementos que forman parte de la misma instalación o familia de materiales tienen valores de periodicidad similares. Esto no quiere decir dos tareas cuya periodicidad es de 20 años se lleven a cabo simultáneamente, sino que la ejecución de cada una de ellas ocurrirá alrededor de ese año. Es importante tener esto en cuenta, ya que al final del estudio de caso veremos que se lleva a cabo una agrupación del impacto ambiental y los costes en periodos de 5 años alrededor de los múltiplos de 5, ya que se estima que éstos ocurrirán aproximadamente en esos ciclos.

Tabla 6.1: Frecuencias de limpieza según tipo de estancia.

Elemento	Salones de actos	Oficinas y despachos	Bibliotecas y salas estudio	Pasillos y escaleras	Salas de reuniones	Núcleos de servicios	Habitaciones	Cocinas	Otros
Barr. suelos	D	2VS	D	3VD	2VS	3VD	2VS	3VD	Q
Freg. suelos	S	S	S	S	Q	3VD	S	3VD	Q
B+F escal.			D	D					
Ap. sanit.	D	D	D		D	3VD	D	3VD	
Papeletas	D	D	D	3VD	D	3VD	D	D	
Pizarras	D	D	D		D				
Teléfonos	D	D	D		D		D		
Mesas	2VS	2VS	2VS		D		2VS	3VD	
Sillas	M	M	M	2VS			M	M	
Eq. inf.	S	S	S		S		S		
Alfombras	S	S	S		S	2VS	S		
Armarios	Q	Q	Q		Q		Q	Q	T
Decoración	Q	Q	Q	S	Q	Q	Q	Q	Q
Puertas	Q	Q	Q	S	Q	Q	Q	Q	Q
Ventanas fác.	M	M	M	M	M	M	M	M	M
Paredes	T	T	T	T	T	T	T	M	T
Puntos luz	T	T	T	T	T	T	T	M	T
Ventanas dif.	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Rejillas a/a	A	A	A	A	A	A	A	A	A

3VD: 3 veces al día D: Diario 2VS: 2 veces por semana S: Semanal Q: Quincenal M: Mensual T: Trimestral A: Anual

6.3. Consumos en servicio

Al tratarse de un edificio existente, se puede afirmar, como exige la norma UNE-EN 15978:2012 [86], que el impacto ambiental asociado a los electrodomésticos auxiliares, mobiliario, decoración y otros objetos del edificio, así como el consumo de electricidad y agua derivado de su uso y mantenimiento, ha sido incluido en los cálculos. Dado que en las facturas, dichos datos no se pueden diferenciar de los correspondientes al consumo de suministros del edificio, resulta imposible informar de estos impactos por separado. Visto por el lado bueno, según Hervá *et al.* [2], la precisión de las estimaciones aumenta con la sustitución de datos medios nacionales por datos recabados directamente.

El edificio estudiado consume electricidad, agua potable, gasóleo C para calefacción y ACS, y propano para las cocinas. Los datos sobre el consumo de suministros para los últimos años se han extraído de contadores y frecuencias de relleno de los depósitos de gasóleo C y propano. Se han tenido en cuenta ciclos completos de un año, de modo que queden reflejadas en el consumo medio anual las cuatro estaciones del año (Tabla 6.2). Para el propósito de esta tesis, se le asume una vida útil de 100 años a partir del año de construcción.

Tabla 6.2: Consumo anual de suministros en el CMHC.

Suministro	Consumo	Unidad
Electricidad	416.000	kWh
Agua potable	7.480	m ³
Gasóleo C	44.000	l
Propano	1.029	l

Capítulo 7

Resultados

En este capítulo se presentan y discuten los resultados de aplicar la metodología de cálculo desarrollada al edificio objeto de estudio. Se muestran en paralelo resultados económicos y ambientales. Todos los datos de carácter anual están referidos a valores de 2015, mientras que los relativos a la vida útil del edificio se obtienen aplicando las tasas de actualización económica y de HE explicadas en la Sección 5.6. Recordar que las mediciones y periodicidades utilizadas se pueden encontrar en el Anexo C, y los resultados del BCRR en el Anexo D de esta tesis.

En primer lugar se estudian los resultados de las distintas ramas definidas en el diagrama metodológico de la Sección 5.5, separando así el consumo de suministros, la limpieza y el mantenimiento y renovación de elementos. Después se muestran y discuten los resultados desde un punto de vista temporal, estudiando la evolución de los costes e impacto ambiental en los 100 años de vida útil del edificio, e identificando aquellos momentos de esta fase del ciclo de vida del edificio en los que se da una necesidad de inversión y un impacto mayor. Por último, se muestra un análisis de sensibilidad centrado en la HE de las tareas de limpieza, con el que se pretenden estudiar las variaciones del impacto con diferentes propuestas de distribución del espacio dedicado a habitaciones.

7.1. Consumo de suministros y superficie

Correspondiente a la rama de “Uso” definida en el diagrama ya mencionado, el edificio provoca un impacto ambiental por el consumo de electricidad, agua, gasóleo C, propano, y la superficie ocupada por la parcela. Es importante remarcar aquí que la HE de la superficie ocupada se produce cada año (siempre que no varíe la superficie de parcela), pero no se acumula a lo largo de la vida útil del edificio. Es decir, es un valor constante no acumulable.

En los resultados se puede observar que alrededor del 4% de la HE anual del uso del edificio corresponde a la superficie ocupada. Al no ser acumulable,

cuando se estudia la HE del uso desde el punto de vista del ciclo completo, la HE de la superficie ocupada se diluye y adquiere menor importancia. El resto, debido al consumo de suministros, se traduce en un claro dominio de la huella de carbono (Tabla 7.1). Esta huella de carbono se debe principalmente al consumo de electricidad y de gasóleo C para calefacción y ACS. Por otra parte, el consumo de propano y agua potable no representan un impacto significativo. El coste económico anual está igualmente controlado por el consumo de electricidad y el de gasóleo C, aunque el agua potable tiene mayor repercusión que en la HE.

Tabla 7.1: HE anual de la rama de “Uso” en valores de 2015.

Fuente del impacto	Consumo	Unidad	Coste (€)	Carbono	Sup. Ocup. (hag/año)	Total	Porcentaje
Electricidad	416.000	kWh	46.631,95	26,071		26,071	43,14 %
Agua	7.480	m ³	14.661,61	0,206		0,206	0,34 %
Gasóleo C	44.000	l	33.044,00	31,133		31,133	51,51 %
Propano	1.029	l	4.277,55	0,390		0,390	0,65 %
Sup. Ocupada	1,050	han			2,636	2,636	4,26 %
Total			98.615,10	57,800	2,636	60,436	100,00 %

Para el propósito de esta tesis, el consumo anual se asume constante durante toda la vida útil, sin considerar variaciones en la eficiencia de las instalaciones, hábitos de consumo o medidas de ahorro energético o de agua. De este modo, la extrapolación a los 100 años de vida útil considerados para el edificio (comenzando en 1948) se calcula aplicando las tasas de actualización antes mencionadas. Esto resulta en un coste total de aproximadamente 7 millones de euros y una HE de 3700 hectáreas globales. Se entiende que los resultados referidos a la vida útil completa del edificio solamente cobran sentido para la comparación con otras etapas. Para todo lo demás, resulta más intuitivo utilizar valores anuales.

7.2. Limpieza del edificio

Respecto a las tareas de limpieza, en la Tabla 7.2 se muestra un desglose de las diferentes fuentes de impacto consideradas, divididas en materiales, mano de obra, maquinaria, y costes indirectos. Hay que tener en cuenta que el consumo estimado de agua potable para la limpieza se debe restar de los datos procedentes de facturación para evitar doble contabilidad. Del mismo modo, si se utilizara maquinaria eléctrica, su consumo se debería deducir de la facturación de electricidad. En este caso de estudio toda la limpieza se lleva a cabo de forma manual. Los costes indirectos para este caso se deben a un supervisor, que coordina y dirige las tareas durante la jornada laboral, y cuyo coste es atribuible a todo el conjunto de las tareas por igual.

Como se puede observar en la Figura 7.1 (derecha), el consumo de alimentos por los trabajadores representa aproximadamente la mitad de la HE de las tareas de limpieza, lo cual proporciona una distribución más uniforme entre las seis categorías de HE (Figura 7.1, izquierda). La segunda fuente de impacto principal es la fabricación de materiales, con casi un 40 %. La HE de los RSU y del transporte de materiales resulta poco significativa en comparación con los demás factores. Esto ocurre por los grandes requisitos de mano de obra que

Tabla 7.2: HE anual de las tareas de limpieza.

Código	Descripción	Concepto	Total	Unidad	Cultivos	Pastos	Mar (hag/año)	Bosques	Carbono	Total
MATERIALES										
		TOTAL								1,871
		FABRICACIÓN								1,781
		TRANSPORTE								0,024
		RSU Mat.								0,066
GW00100	AGUA POTABLE	Fabricación	312,495	m3					0,009	0,009
		Transporte							0,000	0,000
		RSU							0,000	0,000
JL00100	CARRO LIMPIEZA	Fabricación	18.764,066	h				0,692	1,078	1,770
		Transporte							0,024	0,024
		RSU							0,066	0,066
JL00200	KIT DOMÉSTICO LIMPIEZA	Fabricación	293,524	h					0,002	0,002
		Transporte							0,000	0,000
		RSU							0,000	0,000
MANO DE OBRA										
		TOTAL								2,512
		ALIMENTOS								2,421
		RSU Man.								0,090
TP00500	PEÓN ESPECIAL LIMPIEZA	Alimentos	18.764,066	h	1,318	0,352	0,562		0,152	2,384
		RSU							0,089	0,089
TW00100	EMPLEADO DOMÉSTICO	Alimentos	293,215	h	0,021	0,006	0,009		0,002	0,037
		RSU							0,001	0,001
		MAQUINARIA								0,000
COSTES INDIRECTOS										
		COST. IND.								0,200
		ENCARGADO	1.515,000	h	0,106	0,028	0,045		0,012	0,192
		RSU							0,007	0,007
TOTAL			1,445		0,386	0,616		0,692	1,443	4,582

tienen este tipo de tareas.

La HE anual de la limpieza es de 4,58 hectáreas globales, que tras aplicar la tasa de actualización ambiental suponen 350 hectáreas globales para los 100 años de vida útil. El coste anual es de aproximadamente 310.000 €, teniendo en cuenta que el coste de la mano de obra por hora trabajada incluye todos los conceptos del convenio de trabajadores del sector, como la cotización, vacaciones, pagas extra, y demás pluses al salario. Este coste anual, tras aplicar la actualización monetaria, se traduce en un coste aproximado de 22.200.000 € para toda la vida útil del edificio.

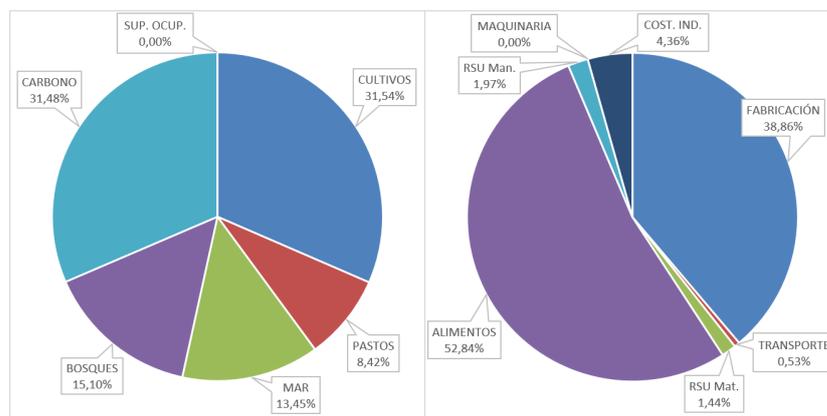


Figura 7.1: HE anual de limpieza por tipo de terreno productivo (izquierda) y por fuente de impacto (derecha).

No se debe interpretar de estos resultados que la mano de obra es algo a lo que hay que poner remedio, sino que se trata de un impacto necesario. La sustitución de la mano de obra por maquinaria autónoma es algo muy complicado en este tipo de tareas.

7.3. Mantenimiento y renovación

En cuanto al mantenimiento y renovación de los elementos del edificio, por motivos de espacio no es posible incluir el desglose completo por Precio Básico, de modo que en la Tabla 7.3 se muestra un resumen clasificado por fuente de impacto y categoría de terreno productivo. La HE del mantenimiento del CMHC, mayor que la de las tareas de limpieza, es de 9,27 hectáreas globales por año. Es preciso especificar que esto es una media aritmética que no refleja la realidad, ya que los impactos de mantenimiento, al contrario de los de limpieza o consumo de suministros, no son iguales todos los años. Las tareas de mantenimiento y renovación tienen lugar con periodicidades generalmente mayores a un año, por lo que provocan impactos puntuales que provocan picos en una hipotética línea de tiempo de la HE del edificio. El impacto total durante la vida útil debido a estas actividades es de aproximadamente 780 hectáreas globales, y el coste total sería de alrededor de 5.700.000 €.

7.4. Fase de uso y mantenimiento

Tabla 7.3: HE anual de las tareas de mantenimiento y renovación.

Código	Descripción	Concepto	Cultivos	Pastos	Mar	Bosques (hag/año)	Carbono	Total
MATERIALES	TOTAL					0,928	8,128	9,056
	FABRICACIÓN					0,928	6,102	7,030
	TRANSPORTE						0,244	0,244
MANO DE OBRA	RSU Mat.						1,782	1,782
	TOTAL		0,110	0,029	0,047		0,023	0,210
	ALIMENTOS		0,110	0,029	0,047		0,013	0,199
MAQUINARIA	RSU Man.						0,011	0,011
	MAQUINARIA		0,001	0,001	0,000		0,002	0,004
TOTAL			0,111	0,031	0,047	0,928	8,153	9,271

Comparando estos resultados con los de la limpieza, aunque la HE total de mantenimiento es 2,25 veces mayor, el coste económico es aproximadamente un 25 % del de limpieza. Esto es debido a la gran necesidad de mano de obra de la limpieza, cuyo precio es considerablemente superior al de los materiales, que como se muestra en la Figura 7.2, tienen una presencia mucho mayor en el mantenimiento y renovación del edificio.

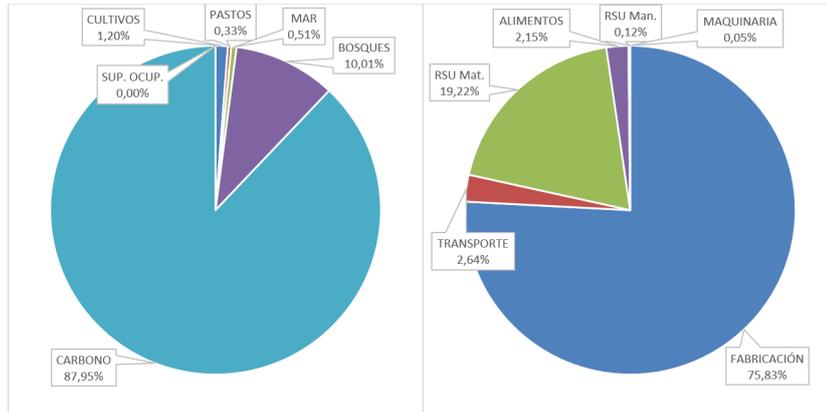


Figura 7.2: HE anual de mantenimiento y renovación por tipo de terreno productivo (izquierda) y por fuente de impacto (derecha).

7.4. Fase de uso y mantenimiento

Si se observan los resultados totales (Tabla 7.4), la HE anual de la fase completa es de 74,28 hectáreas globales, en su mayoría huella de carbono, como es habitual en la aplicación del indicador HE al sector de la edificación. Este dominio de la huella de carbono conduce habitualmente a discusión sobre la metodología del indicador HE, tal como se ha venido mencionando a lo largo de la tesis. Sin embargo, no por ello dejan de desprenderse resultados interesantes del presente estudio.

Si se asumen 139 residentes, la HE anual por persona es de 0,534 hag/pers./año, aproximadamente un 13,66 % de la HE per cápita de España en 2011 [140]. Asimismo, teniendo en cuenta una superficie de parcela de 10.500 metros cuadrados, la HE por unidad de superficie es de 0,46 hag/m² o 0,007 hag/m²/año. Com-

Tabla 7.4: HE anual de la fase de uso y mantenimiento.

Fuente de impacto	Cultivos	Pastos	Mar	Bosques (hag/año)	Carbono	Sup. Ocup.	Total
Uso					57,800	2,636	60,436
Limpieza	1,445	0,386	0,616	0,692	1,436		4,575
Mantenimiento	0,111	0,031	0,047	0,928	8,153		9,271
Total	1,556	0,417	0,664	1,620	67,389	2,636	74,282

parada con la HE de la tipología 5 estudiada por González-Vallejo *et al.* [60], la de características más parecidas, la HE de esta fase es 1,94 veces la de la fase de construcción. Bastianoni *et al.* [54], en cambio, calcula la HE de la construcción de un edificio de apartamentos de cuatro plantas, incluida la renovación de sus elementos, obteniendo un resultado de 0,006 hag/m², 77 veces menor. Esta variación tan significativa de las proporciones se debe a la forma en que se han calculado la HE del consumo de energía directa y la de los alimentos de los trabajadores. Por ejemplo, con respecto a trabajos más recientes de González Vallejo *et al.* [135], el cambio en el cálculo aplicado a los alimentos supone una reducción aproximada del 86 % en la HE correspondiente.

Extendiendo los resultados a los 100 años, con actualización de impactos y costes, el consumo de suministros representa más de tres cuartas partes de la HE de esta fase (Figura 7.3, izquierda). Siempre teniendo en cuenta que se trata de su aplicación al edificio estudiado, los resultados obtenidos para limpieza y mantenimiento son mayores de lo esperado, por lo que justifican la necesidad de estudiarlos detalladamente tal como se hace en la presente tesis. Las tareas de limpieza provocan un impacto relativamente considerable, especialmente en edificios no residenciales, ya que en estos las frecuencias de limpieza son mayores que en ámbito doméstico.

En cuanto al coste económico (Figura 7.3, derecha), la limpieza supone la mayor inversión (22.200.000 €), mientras que el coste del mantenimiento y renovación de elementos queda equilibrado con el del consumo de suministros (57 y 70 millones de euros respectivamente).

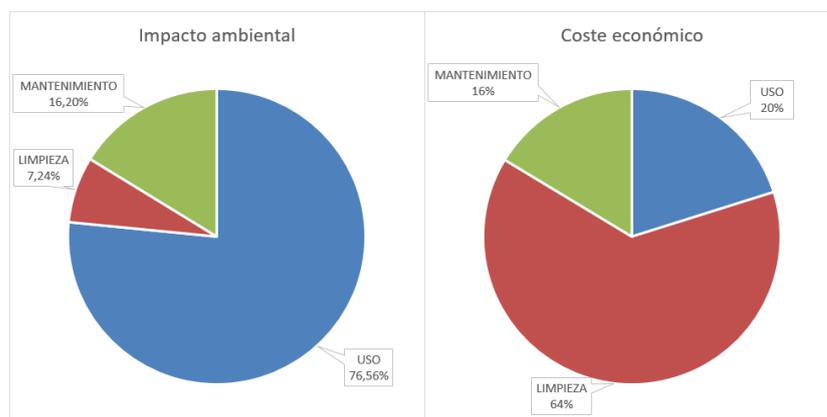


Figura 7.3: Distribución de HE (izquierda) y costes (derecha) anuales de la fase de uso y mantenimiento.

Hay que tener en cuenta que en estas proporciones tiene una alta influencia el tipo de edificio estudiado, cuyo perfil de uso requiere una gran inversión en limpieza, cosa que no ocurre en otros tipos de edificios terciarios, como los de oficinas o los centros comerciales.

En la Figura 7.4 se muestra la distribución de la HE y los costes a lo largo de la vida útil del edificio. Se ha decidido hacer la acumulación de resultados en periodos de cinco años alrededor de los múltiplos de cinco por dos motivos principales: por un lado, las periodicidades utilizadas para el mantenimiento suelen ser en su mayoría múltiplos de este valor; por otro, se ha preferido no asumir que todas las tareas con una misma periodicidad ocurren exactamente en el mismo año, por lo que se estima que se llevan a cabo dentro de ese periodo de cinco años.



Figura 7.4: HE y costes acumulativos por periodos de cinco años.

Se observa entonces que se producen picos, tanto en la HE como en el coste económico, cada 30 años, con un pico aislado a los 75 años, momento en el que se da la renovación de elementos de carpintería de carácter muy resistente, y elementos pétreos en solería. En los picos en años múltiplo de 30 se nota también una mayor proporción de HE de bosques, que corresponde a la renovación de puertas interiores de madera.

Este coste acumulado se ha calculado sin aplicar tasas de actualización, de modo que se pudiera apreciar con más facilidad la fluctuación de los impactos. Si se estudia la misma gráfica con tasas de actualización aplicadas a los costes y la HE de acuerdo a los escenarios definidos en la Sección 5.6, la gráfica se deforma de acuerdo a estos, mostrando sin embargo el coste real según el momento histórico de la vida útil del edificio (Figura 7.5).

7.5. Análisis de sensibilidad

Con el fin de comprobar la sensibilidad del modelo, se han estudiado 35 escenarios diferentes, los cuales se han ordenado de menor a mayor HE (Figura

CAPÍTULO 7. RESULTADOS



Figura 7.5: HE y costes acumulativos aplicando escenarios a largo plazo.

7.6). Estos escenarios están basados en las posibles distribuciones de la superficie construida total dedicada a dormitorios -con baño o sin baño-, núcleos de servicios compartidos, y salas de duchas (1.840 m²) entre cuatro tipos distintos de habitación: individual (11 m²), individual con baño (13,5 m²), doble (15 m²), y doble con baño (18 m²). Se asume que es necesario un núcleo de servicios comunes y una sala de duchas (22,5 m² cada uno) por cada 20 y 40 habitaciones sin baño, respectivamente. Se han estudiado las variaciones de la superficie dedicada a cada uno de estos cuatro tipos de habitación en intervalos del 25 %.

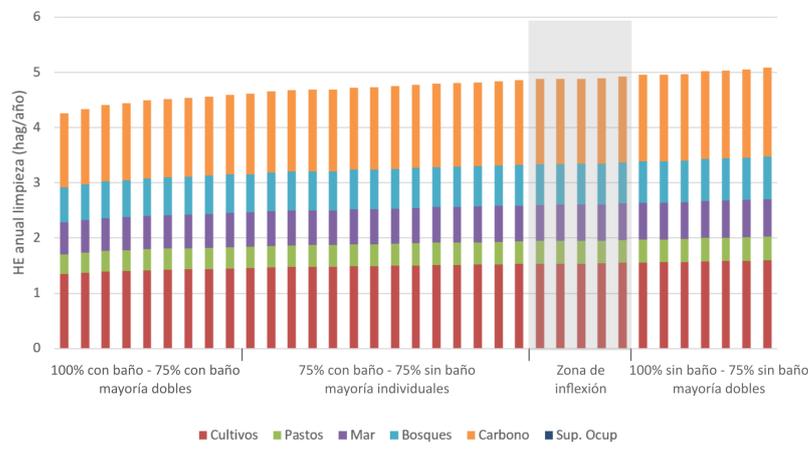


Figura 7.6: Análisis de sensibilidad de la HE de 35 escenarios de limpieza.

Los resultados de este análisis muestran que la HE de las tareas de limpieza es sensible a los cambios en la distribución de espacios. Las distribuciones compuestas exclusivamente de habitaciones con baño producen menos HE. Por el contrario, aquellas con mayoría de habitaciones sin baño obtienen peores resultados. Esto se debe a que los núcleos de servicio y las salas de duchas exigen, y tienen asignada, una mayor frecuencia de limpieza que los baños privados.

Además, en el análisis se produce una zona de inflexión donde el número de núcleos de servicios y salas de duchas se incrementa al mismo tiempo debido a las hipótesis tomadas. Al producirse este pico, dichos casos no cumplen una pauta ni están en armonía con el resto, por lo que no son representativos del conjunto de escenarios tomado.

Capítulo 8

Conclusiones

En la presente tesis se desarrolla un modelo de cálculo para estimar los costes e impacto ambiental de los edificios durante la fase de uso y mantenimiento, incluyendo los consumos de suministros, la limpieza, y el mantenimiento y renovación de los elementos que lo conforman. La fijación de los límites del sistema, por tanto, juega un papel importante. Al comienzo de la tesis se logra establecer dichos límites a dos niveles: longitudinal, en referencia a la duración en el tiempo de la fase de uso y mantenimiento de los edificios; y transversales, en los que se especifican las fuentes de impacto que se consideran imputables al edificio de las que corresponderían a las personas o a otros sectores de la industria. Los límites establecidos, aunque con cierto componente de subjetividad, quedan claramente definidos de modo que cualquier persona que vaya a utilizar el modelo diseñado pueda hacer las modificaciones que desee si no estuviera de acuerdo con algunas de las hipótesis tomadas.

Se ha definido una estructura para la clasificación de las tareas de limpieza y mantenimiento en los edificios, lo que simplifica la implantación y comprensión del modelo dentro del sector de la construcción. Esta estructura, además, sigue las pautas de la Base de Costes de la Construcción de Andalucía (BCCA), lo que abre la posibilidad de una futura inclusión una vez que haya pasado por un proceso exhaustivo de revisión de los precios desarrollados. Asimismo, se describe un método para llevar a cabo una medición relativa a la fase de uso y mantenimiento, en la que se usan transferencias para los elementos constructivos a los que hay que hacer algún tipo de mantenimiento o renovación, y se genera una nueva medición por tipos de estancias o células funcionales y tamaño de las mismas para las tareas de limpieza.

Este modo de estructurar y medir el edificio intenta que el esfuerzo necesario para adaptar la medición de un proyecto de ejecución a los requerimientos del modelo sea el mínimo posible. Los precios desarrollados han sido planteados para poder ser utilizados para cualquier edificio, no solamente para el que se contempla en el estudio de caso. Se ha alcanzado un número considerable de precios nuevos (205 PUF, 120 PUC, 269 PUS sin contar con las versiones modificadas de otros ya existentes, dos PA, y al menos 18 PB), los cuales pueden

servir como base para un desarrollo mayor de cara a su inclusión en la BCCA.

Ha sido necesario desarrollar un Banco de Cuantificación de Recursos (BCRR) que determina los recursos necesarios desglosados en materiales, mano de obra y maquinaria, y sirve como paso intermedio entre la medición y el cálculo de la HE. Para lo último es imprescindible obtener el desglose de la medición en las tres fuentes de impacto, ya que la metodología de cálculo del indicador se aplica sobre dichos elementos. En general, el método de organización se muestra robusto y amigable gracias a un planteamiento altamente lógico, que permite a usuarios de cualquier perfil desarrollar un presupuesto económico y ambiental detallado. El BCRR, además, ha sido diseñado de modo que es capaz de recalcular automáticamente todos los valores cuando se cambian las mediciones o periodicidades utilizadas. Esto, además de agilizar la aplicación del modelo a otros proyectos, permite programar informáticamente cambios entre conjuntos de datos para analizar distintos escenarios u obtener análisis rápidos de big data y de sensibilidad del modelo, siempre que dichos conjuntos de datos estén estructurados de una manera adecuada.

En el diseño del modelo de cálculo de HE para esta fase, la metodología presentada en anteriores publicaciones para la fase de construcción ha sido revisada y, dadas las numerosas singularidades de las tareas aquí estudiadas, la formulación a utilizar ha tenido que ser ajustada. El indicador HE presenta una alta flexibilidad para su adaptación a sectores productivos en lugar de sociedades, para las que estaba concebido.

Dado que se trata de una primera propuesta para modelar el impacto económico y ambiental de esta fase del ciclo de vida de los edificios, todavía no ha sido aplicado a un conjunto de casos representativo. Sin embargo, el estudio de caso presentado permite una discusión inicial centrada en el orden de magnitud de los resultados. La validación a través de su aplicación a un número considerable de casos se plantea como futura línea de trabajo en el siguiente capítulo.

En el estudio de caso analizado, el impacto de las tareas de limpieza representa un 7,4 % de la HE anual, y el mantenimiento un 16,2 %. Este es un porcentaje nada despreciable que debe ser cuantificado. La mano de obra supone un 55 % del impacto de las tareas de limpieza. Como se mencionó en la discusión de los resultados, esto no se debe interpretar como que la utilización de mano de obra es algo negativo. Al contrario, estos incitan a desarrollar futuras investigaciones enfocadas a la influencia de un diseño de edificios cuya limpieza sea más sencilla en los costes e impacto ambiental de dichas tareas. La influencia del grado de desorden de los usuarios en el rendimiento de la limpieza resulta difícil de cuantificar en el modelo de cálculo, ya que este solamente puede ser apreciado por los trabajadores “in situ”.

Asimismo, se detecta un reparto uniforme entre las seis categorías de HE cuando se estudian las tareas de limpieza y de mantenimiento. Sin tener en cuenta el consumo de suministros, el indicador se muestra entonces más útil en la fase de uso y mantenimiento de edificios que en la fase de construcción, donde la huella de carbono domina claramente los resultados debido a la gran necesidad de materiales de construcción.

El análisis de 35 escenarios distintos con posibles distribuciones del espacio dedicado a dormitorios ilustra la sensibilidad del modelo a cambios. Además, la selección de escenarios está orientada a determinar qué configuraciones permiten una reducción de la HE anual de las tareas de limpieza. Se concluye que, con las hipótesis tomadas, aquellas distribuciones con mayoría de habitaciones dobles con baño incluido producen menos HE que la distribución existente en el edificio.

Se demuestra la utilidad de la metodología de cálculo desarrollada para el análisis económico y ambiental de edificios, siendo aplicable tanto a edificios residenciales como terciarios, pero especialmente útil para los últimos, cuyos resultados alcanzan cantidades significativas. La presente metodología promete ser de gran utilidad para los FM, ya que permite estimar y anticipar costes, y facilita la planificación de las tareas de mantenimiento y limpieza. Asimismo, permite a las compañías analizar el comportamiento de sus edificios para utilizar los resultados como estrategia de marketing basada en la sostenibilidad.

Por otro lado, el modelo presenta también ciertas debilidades, tales como la alta representación de la huella de carbono cuando se consideran los consumos de suministros, la falta de un método mejor para cuantificar el impacto causado por el consumo de agua, o la dificultad para predecir la evolución de la economía y de la productividad de los distintos tipos de terreno a largo plazo.

Capítulo 9

Futuras líneas de investigación

En este último capítulo se enumeran posibles futuras líneas de investigación identificadas durante la elaboración de esta tesis, con la certeza de que ésta no acaba aquí, sino que abre un abanico de posibilidades, incluida la mejora de los procedimientos que se han descrito. Se estima que, si bien algunas de las líneas que se presentan requieren un periodo de maduración, otras podrían ser abordadas actualmente.

Las líneas propuestas son las siguientes:

1. Revisión y mejora del listado de precios desarrollados, e inclusión en la Base de Costes de la Construcción de Andalucía con datos ambientales.
2. Aplicación del modelo a un conjunto representativo de proyectos que permita la extrapolación de resultados al parque inmobiliario nacional.
3. Análisis de distintas soluciones constructivas y materiales de construcción para identificar aquellas que reducen la HE del uso y mantenimiento.
4. Optimización del coste e impacto ambiental durante el uso y mantenimiento según el diseño del edificio.
5. Desarrollo de modelo de cálculo de Huella Ecológica del ciclo de vida completo de los edificios.
6. Metodología para el cómputo del consumo de agua en el indicador Huella Ecológica como un nuevo tipo de superficie productiva.
7. Integración del cálculo de HE del ciclo de vida de los edificios en herramientas BIM.

Bibliografía

- [1] Pulselli, R.M., E. Simoncini, F.M. Pulselli y S. Bastianoni: *Emergy analysis of building manufacturing, maintenance and use: Em-building indices to evaluate housing sustainability*. Energy and Buildings, 39:620–628, 2007.
- [2] Herva, M., A. Franco, E.F. Carrasco y E. Roca: *Review of corporate environmental indicators*. Journal of Cleaner Production, 19:1687–1699, 2011.
- [3] Loiseau, E., G. Junqua, P. Roux y V. Bellon-Maurel: *Environmental assessment of a territory: An overview of existing tools and methods*. Journal of Environmental Management, 112:213–225, 2012.
- [4] Herendeen, R.A.: *Emergy analysis and EMERGY analysis - a comparison*. Ecological Modelling, 178(1-2):227–237, 2004.
- [5] Rosen, M.A. y I. Dincer: *Exergy as the confluence of energy, environment and sustainable development*. Exergy, An International Journal, 1(1):3–13, 2001.
- [6] Odum, H.T.: *Self organisation, transformity and information*. Science, 242(4882):1132–1139, 1988.
- [7] Pulselli, R.M., E. Simoncini, R. Ridolfi y S. Bastianoni: *Specific emergy of cement and concrete: an energy-based appraisal of building materials and their transport*. Ecological Indicators, 8(5):647–656, 2008.
- [8] Meillaud, F., J. B. Gay y M.T. Brown: *Evaluation of a building using the emergy method*. Solar Energy, 79(2):204–212, 2005.
- [9] Pulselli, R.M., F.M. Pulselli, U. Mazzali, F. Peron y S. Bastianoni: *Emergy based evaluation of environmental performances of Living Wall and Grass Wall systems*. Energy and Buildings, 73:200–211, 2014.
- [10] Wuppertal Institute: *Wuppertal Institute Website*. Online, 2013. <http://wupperinst.org/en/home/>. Acceso: 11 de octubre de 2013.
- [11] Sinivuori, P. y A. Saari: *MIPS analysis of natural resource consumption in two university buildings*. Building and Environment, 41(5):657–668, 2006.
- [12] Seppälä, J., M. Melanen, I. Mäenpää, S. Koskela, J. Tenhunen y M. R. Hiltunen: *How can the eco-efficiency of a region be measured and monitored?* Journal of Industrial Ecology, 9(4):117–130, 2005.

- [13] Giljum, S., E. Burger, F. Hinterberger, S. Lutter y M. Bruckner: *A comprehensive set of resource use indicators from the micro to the macro level*. Resources, Conservation and Recycling, 55(3):300–308, 2011.
- [14] Lindqvist, A. y F. Vondmalmborg: *What can we learn from local substance flow analyses? The review of cadmium flows in Swedish municipalities*. Journal of Cleaner Production, 12(8-10):909–918, 2004.
- [15] Allan, J.A.: *Virtual water: a strategic resource, global solutions to regional deficits*. Ground Water, 36(4):545–546, 1998.
- [16] Hoekstra, A.Y. y P.Q. Hung: *Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade*. Informe técnico, Value of Water Research Report Series No.11, UNESCO-IHE, 2002. <http://www.waterfootprint.org/Reports/Report11.pdf>. Acceso: Enero 2013.
- [17] Galli, A., T. Wiedmann, E. Ercin, D. Knoblauch, B. Ewing y S. Giljum: *Integrating Ecological, Carbon and Water footprint into a “Footprint Family” of indicators: Definition and role in tracking human pressure on the planet*. Ecological Indicators, 16:100–112, 2012.
- [18] Martínez Rocamora, A.: *Influencia de las bases de datos de ACV en el cálculo de la Huella Ecológica de la edificación*. Trabajo Fin de Máster, Universidad de Sevilla, 2012.
- [19] Azapagic, A. y S. Perdan: *Indicators of sustainable development for industry: a general framework*. Process Safety and Environmental Protection, 78(4):243–261, 2000.
- [20] Weidema, B.P., M. Thrane, P. Christensen, J. Schmidt y S. Løkke: *Carbon footprint*. Journal of Industrial Ecology, 12(1):3–6, 2008.
- [21] Matthews, E., C. Amann, S. Bringezu, M. Fischer-Kowalski, W. Hüttler, R. Kleijn, Y. Moriguchi, E. Rodenburg, D. Rogich, H. Schandl, H. Schütz, E. van der Voet y H. Weisz: *The weight of nations. Material outflows from industrial economies*. Informe técnico, World Resources Institute, Washington, EEUU, 2000.
- [22] Pérez Leal, M.M.: *Huella de Carbono. Herramienta de gestión ambiental, empresarial y social*. Trabajo Fin de Máster, Universidad de Sevilla, 2012.
- [23] US EPA: *Basic Information*. En: *Risk Assessment Portal*. Online, 2013. <http://epa.gov/riskassessment/basicinformation.htm>. Acceso: 1 de febrero de 2013.
- [24] Opschoor, H. y L. Reinders: *In Search of Indicators of Sustainable Development*, capítulo Towards Sustainable Development Indicators, páginas 7–27. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1991.
- [25] Wackernagel, M. y W. Rees: *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Número 9 en *The New Catalyst’s Bioregional Series*. New Society Publishers, Gabriola Island, BC, Canadá, 1996. ISBN 978-0-865-71312-3.

-
- [26] European Commission: *Integrated Policy Product. Development of the Environmental Life Cycle Concept*. Informe técnico, COM, Bruselas, Bélgica, 2003.
- [27] Bare, J.C., P. Hofstetter, D.W. Pennington y H.A. Udo de Haes: *Life cycle impact assessment workshop summary. Midpoints versus endpoints: the sacrifices and benefits*. International Journal of Life Cycle Assessment, 5(6):319–326, 2000.
- [28] Finnveden, G., M.Z. Hauschild, T. Ekvall, J. Guinée, R. Heijungs, S. Hellweg, A. Koehler, D. Pennington y S. Suh: *Recent developments in life cycle assessment*. Journal of Environmental Management, 91(1):1–21, 2009.
- [29] Herva, M.: *An approach for the application of the ecological footprint as environmental indicator in the textile sector*. Journal of Hazardous Materials, 156(1-3):478–487, 2008.
- [30] Eder, P. y M. Narodoslawsky: *What environmental pressures are a region's industries responsible for? A method of analysis with descriptive indices and input-output models*. Ecological Economics, 29(3):359–374, 1999.
- [31] Sartori, I. y A.G. Hestnes: *Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article*. Energy and Buildings, 39(3):249–257, 2007.
- [32] Sharma, A., A. Saxena, M. Sethi, V. Shree y Varun: *Life cycle assessment of buildings: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15:871–875, 2011.
- [33] Buyle, M., J. Braet y A. Audenaert: *Life cycle assessment in the construction sector: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 26:379–388, 2013.
- [34] Cabeza, L.F., L. Rincón, V. Vilariño, G. Pérez y A. Castell: *Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 29:394–416, 2014.
- [35] Bekker, P.C.F.: *A life-cycle approach in building*. Building and Environment, 17(1):55–61, 1982.
- [36] Buchanan, A.H. y B.G. Honey: *Energy and carbon dioxide implications of building construction*. Energy and Buildings, 20:205–217, 1994.
- [37] Cole, R.J. y P.C. Kernan: *Life-cycle energy use in office buildings*. Building and Environment, 31(4):307–317, 1996.
- [38] Adalberth, K.: *Energy use during the life cycle of buildings: a method*. Building and Environment, 32(4):317–320, 1997a.
- [39] Andersen, S., J. Dinesen, H. Hjort Knudsen y A. Willendrup: *Livscyklus-baseret bygning-sprojektering (Life-cycle based building projecting)*. Informe técnico 224, Danish Building Research Institute, Horsholm, Dinamarca, 1993.

- [40] BCCA: *Banco de Costes de la Construcción de Andalucía*. Online, 2013. <http://www.juntadeandalucia.es/fomentoyvivienda/portal-web/web/texto/b28c72fc-4818-11e2-804b-e3c3905d6ca6>. Acceso: 18 de octubre de 2013.
- [41] Tillman, A M., H. Baumann, E. Eriksson y T. Ryden: *Life cycle analysis of selected packing materials. Quantification of environmental loadings*. Informe técnico, Chalmers Industriteknik, Göteborg, Suecia, 1992.
- [42] Adalberth, K.: *Energy use during the life cycle of single-unit dwellings: examples*. Building and Environment, 32(4):321–329, 1997b.
- [43] Blengini, G.A.: *Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: A case study in Turin, Italy*. Building and Environment, 44:319–330, 2009.
- [44] Chen, T.Y., J. Burnett y C.K. Chau: *Analysis of embodied energy use in the residential building of Hong Kong*. Energy, 26(4):323–340, 2001.
- [45] Mithraratne, N. y B. Vale: *Life cycle analysis model for New Zealand houses*. Building and Environment, 39:483–492, 2004.
- [46] Citherlet, S. y T. Defaux: *Energy and environmental comparison of three variants of a family house during its whole life span*. Building and Environment, 42:591–598, 2007.
- [47] Huberman, N. y D. Pearlmuter: *A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert*. Energy and Buildings, 40:837–848, 2008.
- [48] Blanchard, S. y P. Reppe: *Life cycle analysis of a residential home in Michigan*. Informe técnico, Center for Sustainable Systems, University of Michigan, 1998.
- [49] Keoleian, G.A., S. Blanchard y P. Reppe: *Life-cycle energy, costs, and strategies for improving a single-family house*. Journal of Industrial Ecology, 4(2):135–156, 2000.
- [50] Fay, R., G. Treloar y U. Iyer-Raniga: *Life-cycle energy analysis of buildings: a case study*. Building Research and Information, 28(1):31–41, 2000.
- [51] Treloar, G., R. Fay, P.E.D. Love y U. Iyer-Raniga: *Analysing the life-cycle energy of an Australian residential building and its householders*. Building Research and Information, 28(3):184–194, 2000.
- [52] Peuportier, B.L.P.: *Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the French context*. Energy and Buildings, 33:443–450, 2001.
- [53] Blengini, G.A. y T. Di Carlo: *The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings*. Energy and Buildings, 42:869–880, 2010.
- [54] Bastianoni, S., A. Galli, R.M. Pulselli y V. Niccolucci: *Environmental and economic evaluation of natural capital appropriation through building construction: Practical case study in the Italian context*. Ambio, 36(7):559–565, 2007.

-
- [55] Scheuer, C., G.A. Keoleian y P. Reppe: *Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modelling challenges and design implications*. Energy and Buildings, 35:1049–1064, 2003.
- [56] Bin, G. y P. Parker: *Measuring buildings for sustainability: Comparing the initial and retrofit ecological footprint of a century home - The REEP House*. Applied Energy, 93:24–32, 2012.
- [57] Solís-Guzmán, J., M. Marrero y A. Ramírez-de-Arellano Agudo: *Methodology for determining the ecological footprint of the construction of residential buildings in Andalusia (Spain)*. Ecological Indicators, 25:239–249, 2013.
- [58] Teng, J. y X. Wu: *Eco-footprint-based life-cycle eco-efficiency assessment of building projects*. Ecological Indicators, 39:160–168, 2014.
- [59] González-Vallejo, P., M. Marrero y J. Solís-Guzmán: *The ecological footprint of dwelling construction in Spain*. Ecological Indicators, 52:75–84, 2015. doi:10.1016/j.ecolind.2014.11.016.
- [60] González-Vallejo, P., J. Solís-Guzmán, R. Llácer y M. Marrero: *La construcción de edificios residenciales en España en el período 2007-2010 y su impacto según el indicador Huella Ecológica*. Informes de la Construcción, 67(539):e111, 2015.
- [61] Galli, A., J. Kitzes, P. Wermer, M. Wackernagel, V. Niccolucci y E. Tiezzi: *An exploration of the mathematics behind the Ecological Footprint*. International Journal of Ecodynamics, 2(4):250–257, 2007.
- [62] Kitzes, J., A. Galli, M. Bagliani, J. Barrett, G. Dige, S. Ede, K. Erb, S. Giljum, H. Haberl, C. Hails, L. Jolia-Ferrier, S. Jungwirth, M. Lenzen, K. Lewis, J. Loh, N. Marchettini, H. Messinger, K. Milne, R. Moles, C. Monfreda, D. Moran, K. Nakano, A. Pyhälä, W. Rees, C. Simmons, M. Wackernagel, Y. Wada, C. Walsh y T. Wiedmann: *A research agenda for improving national Ecological Footprint accounts*. Ecological Economics, 68:1991–2007, 2009.
- [63] Lenzen, M. y S.A. Murray: *A modified ecological footprint method and its application to Australia*. Ecological Economics, 37:229–255, 2001.
- [64] Borucke, M., D. Moore, G. Cranston, K. Gracey, K. Iha, J. Larson, E. Lazarus, J.C. Morales, M. Wackernagel y A. Galli: *Accounting for demand and supply of the biosphere’s regenerative capacity: The National Footprint Accounts’ underlying methodology and framework*. Ecological Indicators, 24:518–533, 2013.
- [65] WWF: *Living Planet Report 2012*. Informe técnico, WWF International, Gland, Switzerland, 2012.
- [66] van den Bergh, J.C.J.M. y H. Verbruggen: *Spatial sustainability, trade and indicators: an evaluation of the “ecological footprint”*. Ecological Economics, 29:61–72, 1999.

- [67] Ferguson, A.R.B.: *The logical foundations of ecological footprints*. Environment, Development and Sustainability, 1:149–156, 1999.
- [68] Haberl, H., K. H. Erb, F. Krausmann, W. Loibl, N. Schulz y H. Weisz: *Changes in ecosystem processes induced by land use: human appropriation of net primary production and its influence on standing crop in Austria*. Global Biogeochemical Cycles, 15:929–942, 2001.
- [69] Wackernagel, M., C. Monfreda, N.B. Schulz, K. H. Erb, H. Haberl y F. Krausmann: *Calculating national and global ecological footprint time series: resolving conceptual challenges*. Land Use Policy, 21(3):271–278, 2004.
- [70] Kitzes, J., M. Wackernagel, J. Loh, A. Peller, S. Goldfinger, D. Cheng y K. Tea: *Shrink and share: humanity's present and future ecological footprint*. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 363:467–475, 2008.
- [71] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, vol. 4: Agriculture Forestry and Other Land Use*. Informe técnico, IPCC, 2006. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>. Acceso: 20 de febrero de 2014.
- [72] Marland, G., T.A. Boden y R.J. Andres: *Trends: A compendium of data on global change*, capítulo Global, regional, and national fossil fuel CO₂ emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge, TN, EEUU, 2007.
- [73] Khatiwala, S., F. Primeau y T. Hall: *Reconstruction of the history of anthropogenic CO₂ concentrations in the ocean*. Nature, 462:346–350, 2009.
- [74] FAOSTAT: *Statistic division of the Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Online, 2014. <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/home/E>. Acceso: 24 de febrero de 2014.
- [75] Haberl, H.: *Interdisciplinary perspectives on soil protection in a sustainability context: Using the material and energy flow (MEFA) approach in studying land use*. Die Bodenkultur, 57(4):99–109, 2006.
- [76] B., Ewing, A. Reed, A. Galli, J. Kitzes y M. Wackernagel: *Calculation Methodology for the National Footprint Accounts, 2010 Edition*. Informe técnico, Global Footprint Network, Oakland, 2010. http://www.footprintnetwork.org/images/uploads/National_Footprint_Accounts_Method_Paper_2010.pdf. Acceso: 9 de septiembre de 2013.
- [77] FAO, UNECE y: *Temperate and boreal forest resource assessment*. Informe técnico, UNECE y FAO, Ginebra, Suiza, 2000.
- [78] Gulland, J.A.: *The fish resources of the ocean*. Fishing News, West Byfleet, Reino Unido, 1971.
- [79] Pauly, D. y V. Christensen: *Primary production required to sustain global fisheries*. Nature, 374:255–257, 1995.

-
- [80] Dhahi), EAD (Environmental Agency Abu: *Ecological Footprint Roundtable Discussion*. Informe técnico, EAD, Abu Dhabi, United Arab Emirates, March 2006.
- [81] Haberl, H., M. Wackernagel, F. Krausmann, K. H. Erb y C. Monfreda: *Ecological footprints and human appropriation of net primary production: a comparison*. Land Use Policy, 21:279–288, 2004.
- [82] Loh, J. y M. Wackernagel: *Living Planet Report 2004*. Informe técnico, World Wildlife Fundation, Gland, Switzerland, 2004.
- [83] Venetoulis, J. y J. Talberth: *Refining the ecological footprint*. Environment Development Sustainable, 10:441–469, 2008.
- [84] WWF: *Living Planet Report*. Informe técnico, WWF International, Global Footprint Network, ZSL Zoological Society of London, Gland, Switzerland, 2006. <http://www.panda.org/livingplanet>. Acceso: 2 de Septiembre de 2013.
- [85] Basabe del Castillo, J.B.: *Costes e ingresos globales en edificación*. Trabajo Fin de Máster, Universidad de Sevilla, 2012.
- [86] AENOR: *UNE-EN 15978:2012 Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation Method*. Informe técnico, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España, Mayo 2012.
- [87] Marques, A., J. Rodrigues, M. Lenzen y T. Domingos: *Income-based environmental responsibility*. Ecological Economics, 84:57–65, 2012.
- [88] Bastianoni, S., F.M. Pulselli y E. Tiezzi: *The problem of assigning responsibility for greenhouse gas emissions*. Ecological Economics, 49(3):253–257, 2004.
- [89] Cadarso, M.Á., L.A. López, N. Gómez y M.Á. Tobarra: *International trade and shared environmental responsibility by sector. An application to the Spanish economy*. Ecological Economics, 83:221–235, 2012.
- [90] Munksgaard, J. y K. Pedersen: *CO2 accounts for open economies: producer or consumer responsibility?* Energy Policy, 29:327–334, 2001.
- [91] Smith, A.: *La riqueza de las naciones*. Strahan, W., Londres, Inglaterra, 1776.
- [92] BBC: *China seeks export carbon relief*. En prensa, 2009. <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/7947438.stm>. Acceso: 11 de marzo de 2013.
- [93] Rodrigues, J., T. Domingos, S. Giljum y F. Schneider: *Designing an indicator of environmental responsibility*. Ecological Economics, 59:256–266, 2006.
- [94] Proops, J.L.R., G. Atkinson, B.F.V. Schlotheim y S. Simon: *International trade and the sustainability footprint: a practical criterion for its assessment*. Ecological Economics, 28:75–97, 1999.

- [95] Lenzen, M., J. Murray, F. Sack y T. Wiedmann: *Shared producer and consumer responsibility - theory and practice*. Ecological Economics, 61(1):27–42, 2007.
- [96] Laroche, M., J. Bergeron y G. Barbaro-Forleo: *Targeting consumers who are willing to pay more for environmentally friendly products*. Journal of Consumer Marketing, 18(6):503–520, 2001.
- [97] Ferng, J.J.: *Allocating the responsibility of CO2 over-emissions from the perspectives of benefit principle and ecological deficit*. Ecological Economics, 46:121–141, 2003.
- [98] Andrew, R. y V. Forgie: *A three-perspective view of greenhouse gas emission responsibilities in New Zealand*. Ecological Economics, 68:194–204, 2008.
- [99] Kohler, N. y U. Hassler: *The building stock as a research object*. Building Research & Information, 30(4):226–236, 2002, ISSN 0961-3218.
- [100] Heng, H.K.S., W.D. McGeorge y M. Loosemore: *Beyond strategy: exploring the brokerage role of facilities manager in hospitals*. Journal of health organization and management, 19(1):16–31, 2005, ISSN 1477-7266.
- [101] Royal Institute of Chartered Surveyors: *BCIS Building Running Costs Online*. Online, 2015. <http://www.rics.org/es/knowledge/bcis/online-products/bcis-building-running-costs-online/>. Acceso: 12 de febrero de 2016.
- [102] National Institute of Standards and Technology: *Building Life Cycle Cost Program (BLCC)*. Online, 2013. <http://www.energy.gov/eere/femp/building-life-cycle-cost-programs>. Acceso: 27 de noviembre de 2014.
- [103] USACE, U.S. Army Corps of Engineers: *Economic Analysis Package, ECONPACK*. Online, 2014. <http://www.wbdg.org/tools/econpack.php>. Acceso: 27 de noviembre de 2014.
- [104] CBRE y Whitestone Research: *CostLab Pro*, 2015. <http://whitstoneresearch.com/CBRE-Store/Store.html>. Acceso: 12 de febrero de 2016.
- [105] CYPE Ingenieros: *Mantenimiento decenal de CYPE Ingenieros. Calendario de mantenimiento y Valoración de mantenimiento decenal del edificio*, 2015. <http://mantenimiento-decenal.cype.es/>. Acceso: 12 de febrero de 2016.
- [106] ISO: *ISO 15686-5:2008 Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 5: Life-cycle costing*. Informe técnico, International Organization for Standardization, 2008.
- [107] Fuller, S.: *Life-Cycle Cost Analysis (LCCA)*. Informe técnico, National Institute of Standards and Technology (NIST), Washington D.C., EE.UU., 2010.

-
- [108] Junta de Andalucía: *Base de Costes de la Construcción de Andalucía*. Online, 2014. <http://www.juntadeandalucia.es/fomentoyvivienda/portal-web/web/areas/vivienda/texto/7a0899c8-0038-11e4-8cc4-27ee69a25823>. Acceso: 2 de diciembre de 2014.
- [109] Douglas, A., M. Towers, R. Dotz y L. Romani: *Facility Maintenance and Repair Cost Reference 2014-2015*. Whitestone Research, Santa Barbara, CA, EE.UU., 2014a. ISBN: 978-0-9897743-2-1.
- [110] Romani, L., M. Towers, A. Douglas y R. Dotz: *Facility Operations Cost Reference 2014-2015*. Whitestone Research, Santa Barbara, CA, EE.UU., 2014b. ISBN: 978-0-9897743-4-5.
- [111] Marrero, M. y A. Ramírez de Arellano Agudo: *The building cost system in Andalusia: application to construction and demolition waste management*. Construction Management and Economics, 28:495–507, 2010.
- [112] Barón Cano, J.L., J. Conde Oliva, M. Osuna Rodríguez, A. Ramírez de Arellano Agudo y J.A. Solís Burgos: *Clasificación sistemática de Precios Básicos, Auxiliares y Unitarios*. Informe técnico, Junta de Andalucía, 2014.
- [113] Ecoinvent Centre: *Ecoinvent database*. Online, 2015. <http://www.ecoinvent.org/database/>. Acceso: 25 de enero de 2016.
- [114] Martínez-Rocamora, A., J. Solís-Guzmán y M. Marrero: *LCA databases focused on construction materials: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 58:565–573, 2016.
- [115] Junta de Andalucía: *Convenio Colectivo del Sector de Limpieza de Edificios y Locales de Sevilla y Provincia*. Online, Octubre 2013. <http://www.dipusevilla.es/export/bop/201310/25.pdf>. Acceso: 6 de enero de 2016.
- [116] Revuelta Marchena, M.P., A. Ramírez de Arellano Agudo y P. García Vázquez: *Control de costes por anticipación*. Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2015.
- [117] Omniclass: *Omniclass: A strategy for classifying the built environment - Table 13: Spaces by function*. Online, 2012.
- [118] ISO: *ISO 12006-2:2015 Building construction – Organization of information about construction works – Part 2: Framework for classification*. Informe técnico, International Organization for Standardization, 2015.
- [119] Allacker, K.: *Environmental and economic optimization of the floor on grade in residential buildings*. International Journal of Life Cycle Assessment, 17:813–827, 2012.
- [120] Minne, E. y J.C. Crittenden: *Impact of maintenance on life cycle impact and cost assessment for residential flooring options*. International Journal of Life Cycle Assessment, 20:36–45, 2015.

- [121] UN (United Nations) Comtrade: *United Nations Commodity Trade Statistics Database, Statistic division*. Online, 2007. <http://comtrade.un.org>. Acceso: 21 de julio de 2013.
- [122] International Energy Agency (IEA): *International Energy Agency Website*. Online, 2007. <http://www.iea.org>. Acceso: 21 de julio de 2013.
- [123] Solís Guzmán, J.: *Evaluación de la huella ecológica del sector edificación (uso residencial) en la comunidad andaluza*. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, 2010.
- [124] Global Footprint Network: *Learning Package of National Footprint Accounts 2014 edition*. Online, 2014. <http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/licenses1/>. Acceso: 2 de marzo de 2016.
- [125] Masoso, O.T. y L.J. Grobler: *The dark side of occupants' behaviour on building energy use*. Energy and Buildings, 42:173–177, 2010.
- [126] Lindelöf, D. y N. Morel: *A field investigation of the intermediate light switching by users*. Energy and Buildings, 38:790–801, 2006.
- [127] Mahdavi, A., A. Mohammadi, E. Kabir y L. Lambeva: *Occupants' operation of lighting and shading systems in office buildings*. Journal of Building Performance Simulation, 1:57–65, 2008.
- [128] Red Eléctrica de España: *El sistema eléctrico español*. Informe técnico, REE, Madrid, España, 2014.
- [129] IDAE: *Factores de emisión de CO2*. Online, 2011. http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Factores_Conversion_Energia_y_CO2_2011_0a9cb734.pdf. Acceso: 4 de agosto de 2015.
- [130] Domenech Quesada, J.L.: *Huella ecológica y desarrollo sostenible*. Informe técnico, AENOR, Madrid, España, 2007.
- [131] EMASESA: *Sostenibilidad y gestión 2005. Así éramos, así somos. 1975-2005*. Informe técnico, Empresa Municipal de Abastecimiento y Saneamiento de Aguas de Sevilla, S.A., 2005. http://www.aguasdesevilla.com/fileadmin/uploads/tx_user_embed_pdf/ASI_ERAMOS_ASI_SOMOS.pdf. Acceso: 14 de enero de 2014.
- [132] Ministerio de la Presidencia: *Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición*. Informe técnico, Ministerio de la Presidencia de España, Madrid, España, Febrero 2008.
- [133] Almasi, A.M. y L. Milios: *Municipal waste management in Spain*. Informe técnico, European Environment Agency, 2013.
- [134] Freire, A. y M. Marrero: *Analysis of the ecological footprint produced by machinery in construction*. En *World Sustainable Building 14*, Barcelona, España, 2014.

-
- [135] González-Vallejo, P., A. Martínez-Rocamora, J. Solís-Guzmán, R. Llácer Pantión, M.P. Mercader Moyano y M. Marrero: *Ecological Footprint of Manpower in Construction in Spain, Mexico and Chile. Food Consumption*. En *III International Congress on Construction and Building Research*, páginas 75–84, 2015.
- [136] Nogareda Cuixart, S.: *NTP 1011: Determinación del metabolismo energético mediante tablas*. Informe técnico, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, Madrid, España, 2014.
- [137] EUROSTAT: *Municipal waste generated by country in selected years (kg per capita)*. Online, 2015. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Municipal_waste_generated_by_country_in_selected_years_%28kg_per_capita%29_new.png. Acceso: 6 de agosto de 2015.
- [138] Riahi, K., A. Grübler y N. Nakicenovic: *Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization*. *Technological Forecasting and Social Change*, 74(7):887–935, 2007.
- [139] Moore, D., G. Cranston, A. Reed y A. Galli: *Projecting future human demand on the Earth's regenerative capacity*. *Ecological Indicators*, 16:3–10, 2012.
- [140] Global Footprint Network: *EF per capita of Spain*. Online, 2016. <http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/trends/spain/>. Acceso: 12 de enero de 2016.

Índice de figuras

2.1. Flujos de materiales y energía en el ciclo de vida de un edificio	11
2.2. Fases del ciclo de vida completo de un edificio	12
4.1. Metodología general de la investigación	20
5.1. Tipos de área productiva en la Huella Ecológica	26
5.2. Aplicación de los factores de productividad y equivalencia	28
5.3. Huella Ecológica global por componentes	33
5.4. Ciclo de vida del edificio según Adalberth	34
5.5. Ciclo de vida del edificio según Blengini	35
5.6. Ciclo de vida del edificio según Bin y Parker	37
5.7. Definición de fronteras del estudio	40
5.8. Ejemplo de cadena de suministro de un producto alimenticio en botella de vidrio	44
5.9. Papel y responsabilidades del Facility Manager	45
5.10. Estructura de un Precio Unitario Funcional de limpieza	54
5.11. Diagrama de flujos general del modelo de cálculo de HE	65
5.12. Mix energético de la electricidad en España en 2015	68
5.13. Estimación del valor de la moneda en España para el periodo de 1948 a 2047	80
5.14. Escenario BLUE map de la IEA aplicado a la HE mundial por persona	81
6.1. Fachadas frontal y trasera del Colegio Mayor Hernando Colón.	83
6.2. Plano de primera planta del Colegio Mayor Hernando Colón.	85
6.3. Plano de planta baja del Colegio Mayor Hernando Colón.	85
7.1. HE anual de limpieza por tipo de terreno productivo (izquierda) y por fuente de impacto (derecha).	92
7.2. HE anual de mantenimiento y renovación por tipo de terreno productivo (izquierda) y por fuente de impacto (derecha).	93
7.3. Distribución de HE (izquierda) y costes (derecha) anuales de la fase de uso y mantenimiento.	94
7.4. HE y costes acumulativos por periodos de cinco años.	95
7.5. HE y costes acumulativos aplicando escenarios a largo plazo.	96
7.6. Análisis de sensibilidad de la HE de 35 escenarios de limpieza.	96

Índice de tablas

5.1. Factores de equivalencia según las National Footprint Accounts 2008	31
5.2. Huella Ecológica y biocapacidad per capita en España en 2007	32
5.3. Listado de actividades durante la fase de postconstrucción	39
5.4. Esquema de un Precio Unitario Simple de la BCCA	47
5.5. Propuesta de codificación para subcapítulos y apartados del Capítulo 20: Uso y Mantenimiento	48
5.6. Propuesta de codificación de grupos por tipo de tarea	49
5.7. Propuesta de codificación de la periodicidad de las tareas	50
5.8. Cálculo del coste e impacto ambiental de un carro de limpieza con los productos y utensilios necesarios	52
5.9. Coste y factor de emisión de herramientas de distintos gremios	53
5.10. Ejemplo de Precio Unitario Complejo de renovación de solado de mármol blanco Macael	55
5.11. Precio Unitario Simple de demolición de solado de mármol blanco Macael con recuperación de piezas	56
5.12. Precio Unitario Simple de solado de mármol blanco Macael con reutilización de piezas	56
5.13. Precio Unitario Simple de rodapié de mármol blanco Macael con reutilización de piezas	56
5.14. Precio Unitario Funcional de limpieza dos veces por semana en oficina de entre 20 y 40 m ²	57
5.15. Precio Unitario Simple de barrido de suelo liso con una ocupación de su superficie por obstáculos entre un 30 y un 70 %	57
5.16. Precio Unitario Simple de limpieza de mesa o escritorio de trabajo	58
5.17. Tiempos estimados para barrido y fregado de suelos según rugosidad y presencia de obstáculos	58
5.18. Extracto de mediciones aplicadas al mantenimiento de elementos constructivos del edificio	60
5.19. Extracto de mediciones aplicadas a la limpieza de las estancias del edificio	61
5.20. Ejemplo de Precio Unitario Complejo desglosado en el BCRR	62
5.21. Factores de emisión de CO ₂ de los combustibles fósiles	69
5.22. Factor de emisión de combustible para transporte y maquinaria	74
5.23. Huella Ecológica y calorías del consumo de alimentos	78
5.24. Tasa metabólica en función de la actividad	78
6.1. Frecuencias de limpieza según tipo de estancia.	87

CAPÍTULO 9. ÍNDICE DE TABLAS

6.2. Consumo anual de suministros en el CMHC.	88
7.1. HE anual de la rama de “Uso” en valores de 2015.	90
7.2. HE anual de las tareas de limpieza.	91
7.3. HE anual de las tareas de mantenimiento y renovación.	93
7.4. HE anual de la fase de uso y mantenimiento.	94

Nomenclatura

- ACS** Agua Caliente Sanitaria
- ACV** Análisis de Ciclo de Vida
- BCCA** Base de Costes de la Construcción de Andalucía
- BCRR** Banco de Cuantificación de Recursos
- BIM** Building Information Modeling
- CCV** Costes de Ciclo de Vida
- CVE** Ciclo de Vida del Edificio
- CMHC** Colegio Mayor Hernando Colón
- FAO** Food and Agriculture Organization
- FEQ** Factor de equivalencia
- FP** Factor de Productividad
- GAEZ** Global Agro-Ecological Zones
- GEI** Gases de Efecto Invernadero
- GFN** Global Footprint Network
- GLP** Gases Licuados del Petróleo
- hag** Hectáreas globales
- ham** Hectáreas mundiales (de productividad media mundial)
- han** Hectáreas nacionales (de productividad media nacional)
- HE** Huella Ecológica
- IDAE** Instituto para la Diversificación y el Ahorro Energético
- IPC** Índice de Precios al Consumo
- IPCC** Intergovernmental Panel on Climate Change
- PA** Precio Auxiliar
- PB** Precio Básico

PUC Precio Unitario Complejo

PUF Precio Unitario Funcional

PUS Precio Unitario Simple

RCD Residuos de Construcción y Demolición

RSU Residuos Sólidos Urbanos

UNECE United Nations Economic Commission for Europe

