

## **METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA HUELLA ECOLÓGICA DE LA CONSTRUCCIÓN DE EDIFICIOS DE USO RESIDENCIAL EN ESPAÑA**

**Solís Guzmán, J.**

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación, Departamento de Construcciones Arquitectónicas II, Universidad de Sevilla.**

**e-mail: [jaimesolis@us.es](mailto:jaimesolis@us.es)**

### **RESUMEN**

La actividad constructora es en la actualidad una gran consumidora de recursos naturales. Para evaluar este consumo de recursos generalmente se han empleado metodologías relacionadas con el Análisis de Ciclo de Vida. Se plantea en esta comunicación la integración del indicador Huella Ecológica (HE) en el sector edificación, para observar las dificultades y las ventajas que puede generar respecto a otros indicadores. Para ello, se pretende adaptar los conocimientos previos relacionados con el indicador HE al sector residencial de la edificación, analizando la fase de construcción de los edificios, y estableciendo una metodología de cálculo que permita determinar de forma cuantitativa qué impactos genera dicha actividad según el indicador HE. Dicha metodología aplicará el indicador a los recursos (energía, agua, mano de obra, materiales de construcción...) empleados o los residuos generados en el proceso de construcción de la edificación residencial.

La metodología se aplicará a un caso de estudio que corresponde a la construcción de la urbanización y la edificación de una determinada tipología edificatoria representativa en Andalucía (España), realizando el cálculo de la huella ecológica cuando el edificio está en la fase de proyecto. Para ello se empleará una clasificación sistemática de costes de construcción desarrollada en Andalucía que permite ordenar toda la información de la obra según distintos impactos (maquinaria, mano de obra, materiales de construcción...).

Keywords: Huella ecológica, edificio, metodología, recursos, energía

## 1.- Introducción

Dentro de las actividades industriales, la actividad constructora, incluida su industria asociada, es la mayor consumidora de recursos naturales tales como madera, minerales, agua y energía. En la Unión Europea, la construcción de edificios consume el 40% de los materiales, el 40% de la energía primaria y genera el 40% de los residuos, teniendo especial responsabilidad en el actual deterioro del medio ambiente la ampliación del parque edificado [1]. En España, el Plan Nacional de Asignación de Derechos de Emisión 2008-2012 afirma que el sector doméstico y el de edificación consumen el 20% del total de la energía final en España, siendo responsables de la emisión de más del 25% del total de CO<sub>2</sub>. A estas cifras habría que añadir las emisiones debidas a los procesos de fabricación, transporte y generación eléctrica asociados a la edificación, incluidos actualmente en otros apartados [2].

Por tanto, en la búsqueda de la mejora del comportamiento ambiental de los edificios, es necesario evaluar este aspecto a través de indicadores, de forma que se pueda calificar y cuantificar el peso de los impactos ambientales durante todo su ciclo de vida, desde la extracción de las materias primas hasta su demolición. Las herramientas que analizan dichos impactos generalmente siguen la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) [3], [4]. Sin embargo, no existen aproximaciones desde el punto de vista de otras metodologías, como la de la huella ecológica.

El indicador huella ecológica (HE) fue introducido por Mathis Wackernagel [5], que midió la huella ecológica de la humanidad y la comparó con la capacidad de carga del planeta. De acuerdo con su definición, la huella ecológica es la extensión de tierra que sería necesaria para suministrar los recursos (cereales, pienso, leña, pescado y terreno urbano) y absorber las emisiones (CO<sub>2</sub>) de la sociedad mundial [6]. Al compararlo con la extensión de tierra disponible, Wackernagel concluyó que el consumo humano de recursos se situaba actualmente un 50% por encima de la capacidad de carga mundial [7]. Actualmente es considerado uno de los indicadores más relevantes para evaluar los impactos generados en el medio ambiente, y además puede ser usado conjuntamente con otros indicadores, como la huella de carbono o la huella hídrica [8].

El indicador se ha usado desde sus inicios para determinar impactos a muy diversa escala: para predecir los impactos que generará la humanidad sobre el Planeta Tierra [9], para realizar el cálculo periódico de la huella que la humanidad marca sobre el Planeta Tierra [6,7,10], o también para calcular periódicamente las huellas ecológicas de los distintos países [11-13], [14-16], ciudades [17,18], barrios [19,20], sectores productivos [21-23] o industrias [24-29].

Analizando los problemas ambientales que las ciudades generan sobre el medio que les rodea desde la óptica del indicador HE, se ha cuantificado, según algunos estudios [30], que la HE de las familias es de 1,5 ha/año para poblaciones de alta densidad, y de 2 ha para las de baja densidad, por lo que podríamos afirmar que algunos factores de influencia pueden hacer que la HE del consumo familiar disminuya, tales como la alta densidad en áreas residenciales, la disminución de la distancia entre estas áreas y los centros de las ciudades o el diseño de vivienda densa y concentrada.

Es necesario, por tanto, establecer una metodología de cálculo para integrar el indicador HE en el sector de la edificación, para observar las dificultades y las ventajas que puede generar respecto a otros indicadores. A priori, entre esas ventajas podríamos citar la integración del consumo de recursos y generación de residuos en un único indicador, muy intuitivo desde el punto de vista visual o también el uso como potente herramienta de planificación urbanística.

Para el análisis de HE relacionado con la construcción de edificios se ha adaptado en primer lugar la metodología de HE, aplicándola a la región de estudio, Andalucía [18]. Posteriormente, y partiendo de estudios previos sobre la aplicación del indicador HE mediante software REAP [31], se ha propuesto un análisis novedoso de HE por componente a escala de edificio. Por último, siguiendo el procedimiento desarrollado por investigadores españoles [29,32] de cálculo de HE corporativa, se ha considerado el proceso de la construcción de edificios de forma similar al de cualquier otra actividad industrial. Se ha elegido esta metodología, aunque adaptada a las características singulares del sector de la edificación, porque es fácil de comprender, transparente y adaptable [32].

Esta investigación, por tanto, pretende adaptar todos los conocimientos previos relacionados con el indicador HE al sector residencial de la edificación, analizando la fase de la construcción de los edificios, y estableciendo una metodología de cálculo [33] que permita determinar las ventajas e inconvenientes que dicho indicador tiene para el análisis de los impactos ambientales sobre el sector de la edificación.

## **2.- Caso práctico**

El caso propuesto corresponde a la construcción de la edificación y urbanización de una determinada tipología edificatoria de uso residencial sobre la que se aplicará la metodología que se detallará en el siguiente apartado.

Para determinar la tipología edificatoria a analizar, previamente se estudiaron las tipologías representativas del sector residencial en Andalucía [34,35]. De dicho estudio, se concluyó que las predominantes eran las viviendas unifamiliares adosadas de 2 plantas y las viviendas en bloque de 4 plantas sobre rasante. Según estudios previos [30], la ciudad densa y compacta, formada por edificios en altura, consume menos recursos que la difusa y menos densamente poblada, formada por viviendas unifamiliares. Por tanto, al comenzar el análisis de huella ecológica, se decidió elegir aquella tipología que teóricamente generara un menor impacto sobre el territorio por m<sup>2</sup> construido, seleccionándose las viviendas en bloque de 4 plantas, aunque sería necesario aplicar la metodología a varias tipologías residenciales para conocer las variaciones del indicador HE respecto a las mismas.

Siguiendo estas consideraciones, se eligió para el estudio un proyecto de edificación y urbanización de dos bloques de viviendas, de 4 plantas sobre rasante y dos bajo rasante (para aparcamientos) cada uno, que sumaban en total 107 viviendas plurifamiliares, con sus correspondientes plazas de aparcamiento, trasteros y locales comerciales (figura 1). Dicho proyecto se comenzó en la provincia de Huelva en el año 2006 y se terminó en el año 2008, que será el año que se tomará como referencia.

La superficie construida total se recoge en la tabla 1:

<b>Superficie construida</b>	<b>Bloque 1</b>	<b>Bloque 2</b>
Planta baja	1.359,06	1.197,86
Planta primera	1.359,15	1.197,86
Planta segunda	1.363,35	1.201,53
Planta tercera	1.363,35	1.201,53
Total	5.444,91	4.798,78
Superficie total (m <sup>2</sup> )	<b>10.243,69</b>	

Tabla 1: superficie construida de los bloques



Figura 1: Tipología de edificio residencial analizado

Como hipótesis inicial de la investigación, se consideró que en el territorio de estudio la única actividad que ejercía algún impacto sobre el mismo es la que correspondía a la construcción de los bloques de edificios considerados. Y ese impacto sería ejercido durante un período de 12 meses, que es el que se considera necesario para la ejecución de la obra. En el caso de que el período de ejecución se alargara más allá del año planteado, habría que asumir que el impacto o el consumo derivado del proceso edificatorio sería uniforme. Así, si la duración de la obra fuera de 18 meses, tendría un impacto sobre el territorio distribuido en el tiempo de la siguiente forma: durante el primer año se produciría 2/3 del impacto total de la obra y durante el segundo año se produciría 1/3 del impacto total de la obra. Considerar como hipótesis de partida la duración de la obra es necesario también para poder realizar determinados cálculos de impacto, ya que al efectuar el análisis en la fase de diseño del edificio los datos reales de consumo de recursos (agua, electricidad...) necesarios para la ejecución de la obra no estarán disponibles. Además, la metodología de cálculo tendrá siempre un carácter predictivo, por lo que dicha hipótesis estaría suficientemente justificada.

### 3.- Metodología

El análisis de HE se centrará en la fase de implantación y construcción de las edificaciones residenciales, ya que la complejidad de los cálculos de huella ecológica impide extender la investigación a las otras dos fases del ciclo de vida de

los edificios, la de uso y la de demolición. Para ello se seguirá el diagrama de flujo descrito en la figura 2:

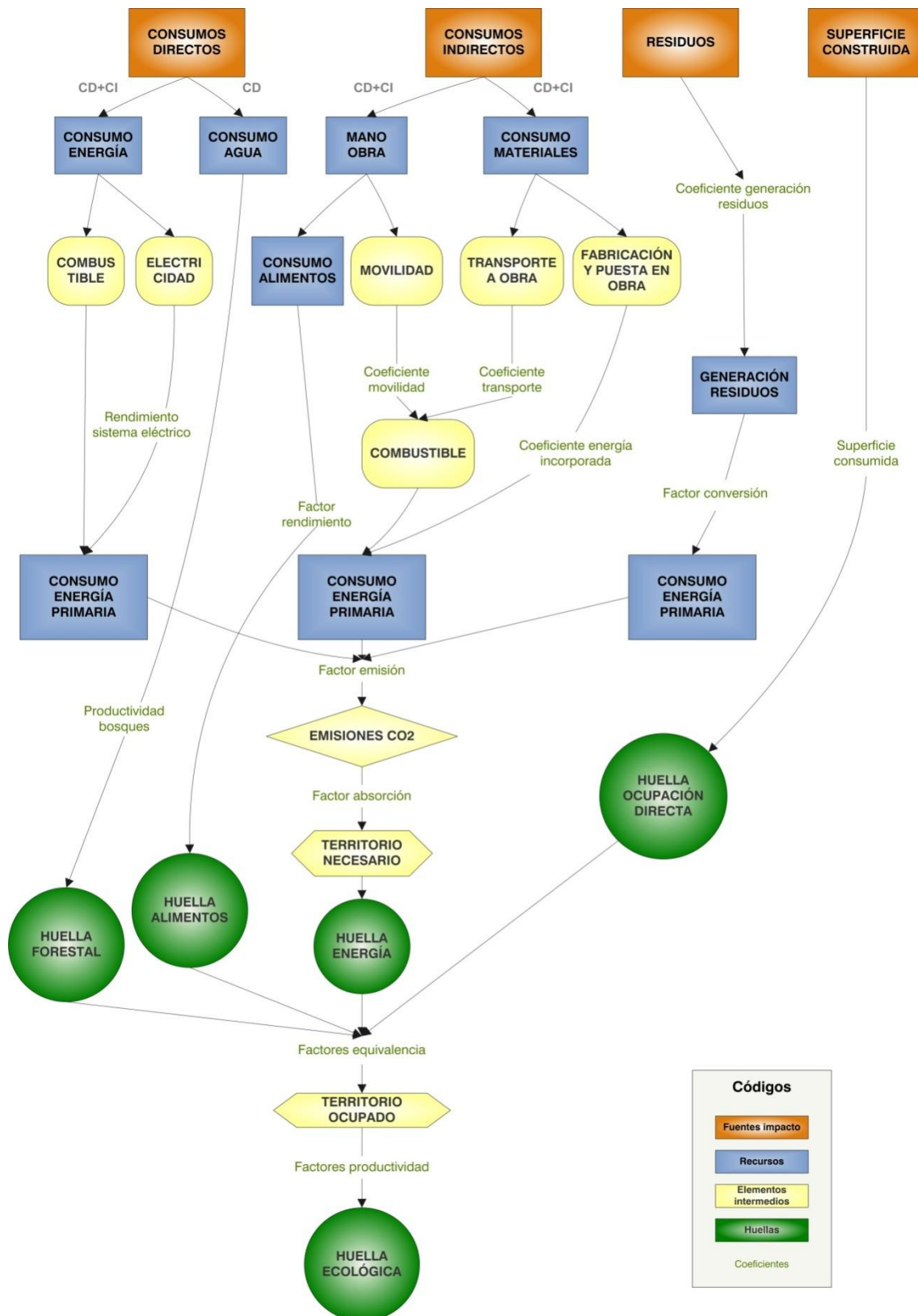


Fig.2 Árbol metodológico de la investigación

1. Definición de las fuentes de impacto: son las generadoras de los impactos sobre el territorio (nivel superior del árbol de la figura 2): consumos directos, consumos indirectos, generación de residuos y superficie construida. Los consumos directos son aquellos que provocan el empleo directo de recursos en la obra, bien a través del gasto de energía (en forma de combustible o electricidad) o de agua. Ambos se ubican en el segundo nivel del árbol, catalogados como recursos (ver recuadro de códigos de figura 2). Los consumos indirectos provocan el empleo indirecto de recursos, ya que los recursos materiales o energéticos utilizados provienen de otros previos, como la mano de obra o el consumo de materiales de construcción. El consumo de mano de obra en la construcción de viviendas genera por una parte, gasto de alimentos por parte de los operarios, y por otra, empleo de combustible derivado de la movilidad de los operarios (desplazamientos hasta el lugar en el que se ubica la construcción). Por su parte, los materiales de construcción, a través de los procesos de extracción, fabricación, transporte y puesta en obra (ver figura 2) consumen combustible (transporte de los materiales a la obra) o energía (necesaria para la fabricación de los materiales y su puesta en obra). Para el análisis de la huella de los materiales se realiza el estudio cuantitativo de los materiales de construcción y cómo se traduce esa cantidad en recursos expresables en términos de HE. Como paso intermedio, se convierte esa cantidad en gasto de energía primaria, al igual que se hace con la electricidad o la movilidad. El tercer factor de impacto son los residuos que se generan en la fase de construcción, que mayoritariamente corresponden a los denominados residuos de construcción y demolición (RCD). Y la última fuente de impacto es la propia superficie construida, que provoca el consumo de territorio, y por tanto, una huella sobre el mismo. Por tanto, cada una de las fuentes de impacto emplea recursos (energía, agua, mano de obra, materiales) o genera residuos.

2. Definición de elementos intermedios (ver recuadro de códigos de la figura 2): permiten transformar los consumos en elementos que nos permitirán definir las distintas huellas que conforman la huella global del sistema de estudio. Son elementos intermedios: combustibles, electricidad, movilidad, fabricación y transporte de materiales de construcción, emisiones de CO<sub>2</sub> y el territorio necesario para absorber las emisiones de CO<sub>2</sub>.

3. Definición de los coeficientes: permiten transformar los consumos y elementos intermedios en huellas parciales. Son los siguientes: rendimiento del sistema eléctrico, productividad de los bosques, factor de rendimiento de los alimentos, coeficiente de movilidad, coeficiente de energía incorporada, coeficiente de generación de residuos, factor de conversión de residuos, superficie consumida, factor de emisión, factor de absorción y factores de equivalencia.

4. Definición de las huellas parciales y total: mediante los elementos intermedios y los coeficientes obtenemos las distintas huellas parciales y total que se generan en el sector residencial. Se ubican en el último nivel de la figura, y se representan mediante círculos de color verde. Las enumeramos: huella forestal, huella de alimentos, huella de energía, huella de ocupación directa y huella ecológica total.

Para estos cálculos, deberemos considerar unos factores de equivalencia actualizados, a fecha de ejecución del proyecto, que conviertan los resultados de hectáreas (ha) a hectáreas globales (hag). Se recogen en la tabla 2.

	<b>gha /ha</b>
Principales tierras agrícolas	2,21
Tierras agrícolas marginales	1,79
Bosques	1,34
Tierras de pastoreo permanentes	0,49
Marinas	0,36
Aguas continentales	0,36
Asentamientos humanos	2,21

Tabla 2: Factores de equivalencia [10]

Para poder aplicar la metodología expuesta, deberemos disponer de un presupuesto ajustado según un sistema de clasificación determinado. Para este análisis, se ha empleado la Base de Costes de Construcción de Andalucía (BCCA) [36]. Esta base se lleva desarrollando durante los últimos 25 años en Andalucía, es la más extendida en esta región, y además es de obligado cumplimiento para los proyectos ejecutados por la Administración andaluza. BCCA no sólo estima el presupuesto de la obra, sino que también permite gestionar la información durante el diseño y la construcción de edificios [37]. Además, define una estructura de costes que distingue entre costes directos y costes indirectos, permitiendo una definición clara de todos los costes que se imputan a un proyecto.

La estructura de costes de dicha base es arborescente y jerarquizada, con niveles claramente definidos, en los que desde el vértice de la jerarquía se desciende hacia los niveles inferiores, fraccionando cada grupo en subgrupos de características homogéneas.

Forman la base de la pirámide los Precios de Suministro, que conectan directamente al sistema con los mercados de factores: mano de obra, materiales, maquinaria, subcontratas, etc. En el vértice de la estructura se sitúan los Importes de Contrata, que enlazan la información de carácter económico con los mercados de productos: edificios residenciales, oficinas, centros docentes, etc. La estructura se completa intercalando entre los extremos, dependiendo del grado de detalle buscado, niveles intermedios con mayor o menor desarrollo en función de las intenciones de los responsables de la presupuestación.

Para este análisis, los niveles empleados de dicha estructura son:

1. El Importe o Presupuesto de Ejecución Material (IEM): cubre todos los costes derivados de la ejecución material del proyecto.
2. Los Precios Básicos (PB): se refieren a elementos constructivos que representan un recurso: mano de obra, materiales o maquinaria.

Para determinar el IEM, la asignación de costes puede ser directa o indirecta. Será directa cuando la asignación de ese coste se realice mediante la aplicación del precio ( $P_i$ ) de un componente de una clase de coste, a la cantidad ( $Q_i$ ) con la que ese componente participa en el coste, siguiendo la siguiente formulación:

$$CD_i = P_i * Q_i \quad (1)$$

Y será indirecta cuando la asignación de un coste se realice mediante la aplicación de un valor relativo ( $T_i$ ) respecto a otro ( $V_i$ ) de referencia.

$$C_{li} = T_i\% * V_i \quad (2)$$

Siguiendo el razonamiento expuesto, se denominan Costes Directos (CDi) a todos los costes que se integren en la estructura mediante imputación directa y Costes Indirectos (C<sub>li</sub>) a los que se imputen por vía indirecta.

En nuestro estudio, todos los costes se imputan de manera directa, por lo que previamente se analizaron los costes indirectos para poder integrarlos en el presupuesto de manera directa, de forma que todos los costes derivados del proceso de la construcción estuvieran claramente definidos. Por tanto, para conocer el presupuesto total de la obra, será necesario conocer no sólo el Coste Directo de Ejecución, sino además los Costes Indirectos y los Costes de los Estudios de Seguridad y Salud, que habitualmente se analizan por separado. Además, para poder hacer el cálculo pormenorizado de los recursos empleados en la construcción de los edificios deberemos disponer de un Presupuesto ajustado según la BCCA del año 2008, ya que es el año que tomamos para el estudio. Para ello se han rehecho los presupuestos para conseguir precios ajustados a esta base. Por tanto, el procedimiento a seguir para determinar el presupuesto total ha sido:

1. Obtener el Presupuesto de Ejecución Material de la obra de edificación.
2. Obtener el Presupuesto de Ejecución Material de la obra de urbanización
3. Rehacer los Presupuestos para ajustar los precios a la BCCA (año 2008)
4. Integración de los Costes Indirectos en el Presupuesto de Ejecución.
5. Integración del Presupuesto del Estudio de Seguridad y Salud en el Presupuesto de Ejecución
6. Cálculo del Presupuesto global

$$P_G = CDE_E + CDE_U + C_I + C_{SS} \quad (3)$$

Donde:

PG: Presupuesto global (IEM)

CDE<sub>E</sub>: Coste Directo de Ejecución de la obra de edificación según BCCA.

CDE<sub>U</sub>: Coste Directo de Ejecución de la obra de urbanización según BCCA.

C<sub>I</sub>: Presupuesto de Costes Indirectos, según BCCA.

C<sub>SS</sub>: Presupuesto del Estudio de Seguridad y Salud, según BCCA.

El presupuesto global aparece en la tabla 3.

	Presupuesto (€)
CDE <sub>E</sub>	5.067.139,67
CDE <sub>U</sub>	187.613,37
C <sub>I</sub>	380.726,02
C <sub>SS</sub> edificación	51.867,43
C <sub>SS</sub> urbanización	938,07
P <sub>G</sub>	5.688.284,55

Tabla 3: Resumen del Presupuesto global de la obra



### 3.1.- Determinación de la huella derivada del consumo de energía

Para predecir el consumo de energía producido en la construcción de una obra partiremos de los datos que proporcionan las fórmulas polinómicas [38,39], que estiman el porcentaje sobre el presupuesto total de los recursos empleados en la obra, para 48 tipologías de obras de construcción (carreteras, canales, ferrocarriles, edificación...), tanto de iniciativa pública como privada (tabla 4).

Para nuestro caso, empleamos la tipología 18 de dichas fórmulas: “aquellos edificios con estructura de hormigón armado y presupuesto de instalaciones menor del 20% del presupuesto total”. Además, al ser la edificación de estudio una promoción de viviendas de protección oficial, se considera que la contratación es del tipo oficial o pública.

Los coeficientes de la tabla 4 representan el tanto por uno sobre el importe total de cada tipo de obra. Dicho importe es sin IVA, una vez descontado el beneficio industrial y los gastos generales. El 15% restante serían los Costes Indirectos. En este caso, dichos costes sí se imputan de forma directa, por lo que los porcentajes de la tabla 4 se incrementan para obtener el 100% del presupuesto (PG), obteniendo los coeficientes corregidos, que serán los que emplearemos para los cálculos. Cada una de las iniciales de la tabla 4 hace referencia a los siguientes conceptos: h: coste laboral, e: energía, c: cemento, s: acero, m: madera y Cr: cerámica

Por tanto, para nuestro caso el consumo energético de la obra se podría estimar como el 9% del PG.

Tipología	h	e	c	s	m	Cr	Total
Tipol. 18	0,36	0,08	0,12	0,12	0,07	0,10	0,85
Tipol. 18 (corregida)	0,42	0,09	0,14	0,14	0,08	0,12	1,00

Tabla 4: Fórmulas polinómicas de la tipología 18 (contratación oficial)

Como hipótesis de partida, consideramos que el consumo total de energía de la ejecución de la obra se reparte entre la energía eléctrica y el combustible empleados, ya que al ser un análisis de la huella a nivel de diseño de proyecto no se pueden determinar los consumos. Por tanto, una vez que se haya determinado el consumo de energía total y el de combustible, se considera que la diferencia entre ambos es el consumo de energía eléctrica en la obra.

Una vez definido el coste energético de la construcción de la obra (en unidades monetarias), el siguiente paso es determinar el consumo de combustible que se produce en la obra, que es originado por el empleo de maquinaria. En primer lugar se realizaría el cálculo, a través de las mediciones del proyecto, de las horas de maquinaria empleada, y a continuación, el cálculo del coste económico del empleo de dicha maquinaria (tabla 5).

	Horas	Coste euros/h	Coste euros
Pala cargadora	272,29	23,87	6.499,56
Camión basculante	1.298,44	25,60	33.240,06
Retroexcavadora	40,93	34,98	1.431,73
Camión cisterna	0,74	30,30	22,42
Rulo vibratorio	178,00	23,28	4.143,84
Pisón mecánico manual	311,09	3,01	936,38

Tabla 5: Ejemplos de cálculo de consumo de maquinaria asociada a CDEE del caso analizado

Para obtener el consumo de combustible en litros, deberemos conocer la tarifa del combustible empleado y actualizar dicho dato al año de realización del proyecto, que en este caso es 2008.

Según estudios previos [5], es necesario considerar también el consumo de combustible necesario para la fabricación y mantenimiento de vehículos, y que se cifra en un 15 % extra. Como la amortización de la maquinaria está incluida en el coste horario de la misma, dicho porcentaje no se considerará para el cálculo. Además, la fabricación de la maquinaria no se considerará, ya que computará a la empresa que la fabrique.

Una vez definido el consumo de combustible en unidad de volumen (litros), la huella del consumo de combustible se expresa como:

$$HE_{pc} = \frac{C}{PE} * FE_B \quad (4)$$

HE: huella ecológica ponderada del consumo de combustible (hag)

C: consumo de combustible (GJ)

PE: productividad energética del combustible (GJ/ha), que se considera la del petróleo (tabla 6). La productividad energética de un combustible se expresa como:

$$PE = \frac{F_a}{F_e} \quad (5)$$

donde  $F_a$  es el factor de absorción y  $F_e$  el factor de emisión.

FEB: factor de equivalencia de los bosques (hag/ha)

Determinado el consumo de combustible, se calcula el consumo de energía eléctrica en la obra. Para expresar ese dato en unidad de consumo energética, empleamos el modelo de facturación de la electricidad en Andalucía. Una vez obtenido ese dato, será necesario conocer el origen de la energía eléctrica. Como las energías renovables tienen productividades energéticas muy altas [40], se considerará como hipótesis que las huellas de las mismas son despreciables frente a la huella procedente de combustibles fósiles y de la energía nuclear.

Después emplearemos los datos de productividad energética de los combustibles (tabla 6) y de factor de eficiencia para producción de electricidad. Se considera un factor de absorción de bosques de 5,21 t CO<sub>2</sub>/ha y año [29] y un factor de eficiencia para producción de electricidad de 0,3 [41].

Fuentes de energía	Fe (kg C/GJ) [18]	PE (GJ/ha)
<i>Fósiles</i>		
Carbón	26	55
Petróleo	20	71
Gas natural	15,30	93
<i>Nuclear</i>	20	71

Tabla 6: Factores de emisión y productividades energéticas de fuentes de energía

La fórmula empleada será:

$$HE_{pee} = \sum_i \frac{C_i}{PE_i} * FE_B \quad (6)$$

HEpee: Huella ecológica ponderada del consumo de energía eléctrica (hag)

Ci: Consumo de energía primaria (GJ)

PEi: Productividad energética (GJ/ha)

Los consumos proceden del consumo de energía primaria i aplicada a cada una de las fuentes, al igual que la productividad energética.

### 3.2.- Determinación de la huella derivada del consumo de agua

Aunque la huella del consumo de agua no está reflejada en la metodología de huella ecológica, incluimos esta aportación para poder contabilizar dichos consumos.

El procedimiento a seguir sería:

1. Determinar rangos de consumos de agua y de presupuesto en obras de dimensiones similares a la que se va a analizar, para establecer el ratio coste obra/consumo de agua.
2. Definir consumo medio de agua de la obra a analizar, mediante interpolación con los datos obtenidos en el punto anterior. La interpolación se basará en el Presupuesto Global de la obra.
3. Determinar la HE. Se considera como procedimiento de cálculo aquel que considera al bosque como productor de agua, motivo por el cual el consumo de este recurso se incluye en el área forestal. Para calcular la productividad del agua (m<sup>3</sup>/ha/año), se considera la hipótesis de que un bosque de zonas húmedas puede producir 1.500 m<sup>3</sup> de agua dulce por hectárea y año [29]. Por tanto, para el cálculo de la huella ecológica del suministro de agua usamos la fórmula que emplea dicho coeficiente:

$$HE_{pa} = \frac{C}{Pb} * FE_B \quad (7)$$

HEpa: huella ecológica ponderada del agua (hag)

C: consumo de agua (m3)

Pb: productividad de bosques (m3/ha).

FEb: factor de equivalencia para los bosques.

### 3.3.- Determinación de la huella vinculada al consumo de alimentos

Se imputa la manutención de los trabajadores a la huella de la edificación ya que dicha actividad se desarrolla en el interior de la obra, de forma similar a la metodología desarrollada por Domenech Quesada [29], que imputa las comidas de empresa a la huella corporativa de la misma.

Para ello, en primer lugar es necesario conocer el número total de horas trabajadas por la mano de obra para la totalidad de la obra, obtenidas a través de la medición del proyecto. Dicha mano de obra se encuentra desglosada según la Clasificación Sistemática del BCCA [36]. Igualmente de dicha Clasificación se obtiene el coste de la mano obra (unidad monetaria/h).

Para el cálculo de la huella empleamos la expresión:

$$HE_{pal} = \frac{HE_c}{h_c} * N_h \quad (8)$$

Donde

HE<sub>pal</sub>: huella ecológica ponderada de los alimentos (hag)

HE<sub>c</sub>: huella ecológica expresada como hag/comida

h<sub>c</sub>: 8 horas/comida. Se considera 1 única comida por cada jornada de trabajo.

N<sub>h</sub>: número total de horas trabajadas

Será, por tanto, necesario obtener HE<sub>c</sub> de los distintos alimentos que conforman la comida diaria del trabajador.

Según la metodología empleada, se generarán cuatro tipos de huella:

- Huella de origen fósil: generada por todos los alimentos, ya que requieren algún tipo de elaboración, o como en el caso del pescado se consume combustible para su captura. Se traduce en territorio para la absorción de CO<sub>2</sub>. La fórmula de cálculo sería:

$$HE_{cf} = \frac{C * IE}{PE} * FE_B \quad (9)$$

Donde:

HE<sub>cf</sub>: HE fósil (hag/comida)

C: consumo (t)

IE: intensidad energética (GJ/t)

PE: productividad petróleo (GJ/ha)

Si desarrollamos la expresión anterior:

$$C * IE = \frac{Cs}{1000} \left[ \sum_i \frac{\%alim_i}{100} * C_i * IE_i \right] \quad (10)$$

Donde cada uno de los factores considerados sería:

Coste (Cs): se ha considerado un coste por menú de 10 €.

% alim<sub>i</sub>: porcentaje del presupuesto que representa cada uno de los alimentos.

Ci: consumos en toneladas por cada 1.000 €.

IEi: intensidades energéticas.

Alimentos	% alimi	Ci (t/1000€)	IEi(GJ/t)	Pni (t/ha)
Carnes	25	0,65	80	0,033
Pescados	25	0,50	100	0,029
Cereales	12	4,69	15	2,264
Bebidas	10	0,34	7	22,500
Legumbres	8	1,45	10	6,730
Dulces	6	0,70	15	4,893
Aceites	5	0,71	40	1,485
Lácteos	5	0,93	37	0,276
Café	4	0,54	75	0,566

Tabla 7: parámetros para el cálculo de la huella de alimentos [29]

- Huella de pastos: la genera la carne y los lácteos.
- Territorio agrícola: cereales, bebidas, patatas, dulces, aceites y café.
- Mar productivo: área para producir pescado y marisco.

Para estos tres tipos de huellas, partiremos de los datos de productividad natural (tabla 7), distinguiendo entre los tres tipos de superficie consumidas: pastos, cultivos y mar.

Como ejemplo, para el caso de los pastos:

$$HE_{cpa} = \frac{C}{Pn} * FE_p \quad (11)$$

Donde:

HEcpa: huella ecológica de pastos (hag/comida)

Pn: productividad natural (t/ha)

FEP: factor de equivalencia de los pastos

La expresión desarrollada sería:

$$\frac{C}{Pn} = \frac{Cs}{1000} \left[ \sum_i \frac{\%alim_i * C_i}{Pn_i} \right] \quad (12)$$

Donde % alimi representa el porcentaje del presupuesto de cada uno de los alimentos de la tabla 7 que pertenecen a pastos. En este caso, carnes y lácteos.

### 3.4.- Determinación de la huella de movilidad

Para determinar la HE relacionada con la movilidad de los trabajadores, se harán las siguientes hipótesis:

1. Se establecerá como tipo de transporte el vehículo privado, ya que supondremos que la obra se sitúa en una zona alejada del núcleo urbano, por lo que sería complicado el desplazamiento con otro medio de transporte.
2. Se establecerá distancia media recorrida por los vehículos de los operarios en los desplazamientos. Se asume 15-30 km de distancia media.
3. La ocupación media por vehículo será de 4 individuos por vehículo. Para conocer el número de trabajadores, deberemos conocer el número total de horas trabajadas (calculado en el apartado previo de alimentos) y la duración efectiva de la obra en horas. Ambos datos se obtendrán de la BCCA [36].
4. Para el cálculo del consumo de combustible emplearemos coeficientes de consumo de coches en España [41]. Haciendo un análisis similar al del consumo de combustible de la maquinaria, es necesario considerar un consumo de combustible extra para el mantenimiento del vehículo, que se cifra en el 10%.
5. La huella de movilidad se determinará siguiendo el procedimiento del apartado de energía.

### 3.5. Determinación de la huella de materiales de construcción

Para determinar la huella de los materiales de construcción emplearemos la siguiente expresión:

$$HE_{pm} = \frac{\sum_i C_{m_i} * E_{i_{em_i}}}{PE} * FE_B \quad (13)$$

Donde:

HE<sub>pm</sub>: huella ecológica ponderada de materiales de construcción (hag)

C<sub>m<sub>i</sub></sub>: consumo del material (kg)

E<sub>i<sub>m<sub>i</sub></sub></sub>: energía incorporada específica del material i (MJ/kg)

PE: productividad energética del petróleo (MJ/ha)

Se imputa la huella de los materiales a huella de origen fósil, aclarando que los materiales de construcción procedentes de la madera empleados en la obra representan un porcentaje ínfimo sobre el total.

Los valores de energía incorporada empleados proceden de varias fuentes [42-45], tomándose como valor de energía la media de los valores disponibles, siempre que no exista gran disparidad entre dichos valores. Dicha energía incorporada incluye la fabricación, transporte y puesta en obra de los materiales de construcción.

Conocidos dichos valores, se determinarán los consumos de materiales (en peso) a través de las mediciones del proyecto estudiado. Se emplearán los precios básicos de la BCCA (año 2008). Para convertir las unidades de medida de los precios básicos (m, m<sup>2</sup>, m<sup>3</sup>...) en peso se emplearán los coeficientes calculados por Mercader [34] (tabla 8).

	u	M <sub>m</sub> (u)	M <sub>me</sub> (u)	P <sub>m</sub> (€/u)	C <sub>c</sub> (kg/u)	C <sub>stm</sub> (€)	C <sub>m</sub> (kg)	E <sub>iem</sub> (MJ/kg)	E <sub>im</sub> (MJ)
ACERO B- 500-S	kg	234.915,31	223.728,87	0,77	1,00	180.884,79	223.728,87	40,00	8.949.154,86
HORMIGÓN HA-25/ B/ 40/ lia	m3	1.271,37	1.234,34	69,32	2.500,00	88.131,37	3.085.849,51	1,00	3.085.849,51
LADRILLO CERÁMICO HUECO DOBLE 24 X 11,5 X 9 cm	mu	239,610	226,05	98,28	1.550,00	23.548,87	350.373,11	2,90	1.016.082,03
PANEL DE CARTÓN-YESO DE 13 mm DE ESPESOR	m2	21.253,45	20.241,38	4,55	10,00	96.703,20	202.413,81	7,00	1.416.896,67
CEMENTO CEM II/A-L 32,5 N EN SACOS	t	173,07	164,83	92,54	1.000,00	16.015,81	164.827,65	7,00	1.153.793,53
PUERTA CORREDERA ALUM. LACADO (T-III)	m2	327,60	327,60	69,60	20,00	22.800,96	6.552,00	200,00	1.310.400,00

Tabla 8: Ejemplos de cálculo de energía incorporada de los materiales más representativos

El ejemplo mostrado en la tabla 8 corresponde al estudio de la edificación de nuestro proyecto, particularizado para algunos de los materiales más representativos, desde un punto de vista cuantitativo, de la obra. La agrupación de los precios básicos se ha hecho en función precisamente de los materiales más representativos o de los que se dispusiera de información de energía incorporada. En la segunda columna de la tabla 8 aparece la unidad en la que se mide el precio básico. El resto de columnas representan:

- M<sub>m</sub>: medición del precio básico del proyecto considerado.
- P<sub>m</sub>: precio básico (conforme a BCCA de 2008)
- C<sub>stm</sub>: coste total del material (€)

$$C_{stm} = M_m * P_m \quad (14)$$

- M<sub>me</sub>: medición del material que se queda integrado en el edificio. Se relaciona con M<sub>m</sub> mediante un coeficiente de pérdidas que tiene en cuenta la parte del material que no se queda integrado en el edificio.
- C<sub>c</sub>: coeficiente conversión de la unidad de medida del precio básico en peso (kg). Para ello se han empleado los coeficientes calculados por Mercader [34].
- C<sub>m</sub>: consumo o peso del material (kg)

$$C_m = M_{me} * C_c \quad (15)$$

- E<sub>iem</sub>: energía incorporada específica del material i. Los valores de E<sub>iem</sub> proceden de las fuentes referenciadas anteriormente.
- E<sub>im</sub>: energía incorporada total (MJ)

$$E_{im} = C_m * E_{iem} \quad (16)$$

Realizando un análisis similar con todos los materiales que encontramos en la ejecución de obra, obtenemos los consumos de los materiales, su energía incorporada, y finalmente, la huella ecológica derivada del empleo de materiales de construcción.

### 3.6.- Determinación de la huella de los residuos

En esta apartado analizaremos cómo se puede evaluar el impacto ecológico de los residuos, centrándonos en aquellos más relevantes para nuestra investigación: los residuos urbanos y los residuos de construcción y demolición (RCD).

Los residuos generados a lo largo del proceso de vida de un edificio son variados y de orígenes diversos. Al centrarnos en la fase de construcción del edificio, deberemos tener en cuenta por una parte, los residuos sólidos urbanos (RSU) que se generan en el lugar donde se esté edificando, y por otro, los RCD que se generen en esta fase. De los primeros, distinguiremos entre cuatro tipos: materia orgánica, papel/cartón, plásticos y vidrio. Para el caso de los RCD, se considerará dos tipos de residuos, según los modelos de gestión que existen en las plantas de tratamiento de RCD en Andalucía: las tierras de excavación y los RCD mixtos. Los RCD mixtos agrupan los restos de materiales generados en la ejecución de la obra y los envases que contenían los materiales que se han empleado en la construcción de la edificación. En una obra de nueva construcción, las tierras de excavación pueden representar más del 80% de esos residuos, mientras que los RCD mixtos se reparten de forma proporcional entre los restos de materiales y envases [46].

Para poder determinar la huella de esos residuos, nos basaremos en la metodología de los estudios de Wackernagel [47], en los que se afirma que la huella asociada a depósito de residuos, emisiones o vertidos se calcula del mismo modo que para los materiales, con su misma intensidad energética, restando el porcentaje de energía que puede recuperarse por reciclaje.

Así, según Wackernagel, se estima que para el papel y el cartón puede recuperarse un 50% de energía por reciclaje. Es decir, si por ejemplo la huella de x toneladas de residuos de papel es de 20 ha, con un 100% de reciclaje, la huella quedaría en 10 ha.

Para los residuos de papel, tendríamos por una parte la huella fósil (de las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al consumo energético) y la huella forestal del consumo de bosques para la fabricación del papel que no se ha podido reciclar.

En general, podemos decir que para producir un material reciclado, nos ahorramos por una parte consumo de energía, porque generalmente la obtención de materiales reciclados requieren procesos que consumen menos energía, y por otra consumo de tierra, porque no hay que realizar extracciones de material, y en ocasiones, además, el consumo proporcional de los vertederos, a los que van a parar los materiales no reciclados.

Hemos de aclarar que en la metodología que vamos a emplear todos los consumos se imputan a la huella fósil, o en el caso del papel, además a la huella forestal. Por tanto, esta metodología no va a incluir huella de superficie construida procedente de vertederos o plantas de tratamiento, ya que esa huella se deberá tener en cuenta en el caso de los análisis regionales o locales, y no desde el punto de vista del impacto del proceso constructivo.

El procedimiento emplea índices de conversión [48] ya incorporados en las investigaciones de Domenech [29]. Estos índices de conversión se pueden referir a residuos de muy diverso origen (peligrosos, no peligrosos, papel...). Para nuestro



caso de estudio, consideramos de interés los no peligrosos y los procedentes del papel.

Para los residuos no peligrosos, se utiliza la intensidad energética de producción del material del que está fabricado el residuo, descontando el porcentaje de energía que puede recuperarse por reciclaje. Algunos de estos residuos no peligrosos son los orgánicos, las tierras de excavación o los residuos mixtos. Empleamos la fórmula que presentamos a continuación:

$$IC_x = \frac{IE_x}{PE} * (1 - \frac{\%R_x}{100} * \frac{\%SE_x}{100}) * FE_F \quad (17)$$

Donde cada uno de esos términos es:

ICx: índice de conversión ponderado del residuo no peligroso (hag/t)

IE<sub>x</sub>: intensidad energética de producción del material del que está fabricado el residuo. Para conocer estos valores tenemos que conocer las intensidades energéticas de los materiales que se van a reciclar. Los datos se recogen en la tabla 9.

PE: productividad energética del residuo (se asume que es igual a la de los combustibles fósiles).

%R<sub>x</sub>: porcentaje de reciclaje de x. Para el caso de los residuos orgánicos, se ha empleado información de alcance nacional [49], determinando el porcentaje de la tabla 9 (13%) a partir de los residuos orgánicos realmente compostados del flujo de los residuos tratados para compostaje. Para los otros flujos (papel, plásticos y vidrio) empleamos datos de la Administración andaluza [50] sobre tasas de reciclado en Andalucía. Para las tierras de excavación, se estimó una reutilización del 50% en obra y un reciclaje en plantas de tratamiento del material no reutilizado del 80%, aunque realmente todo el material es susceptible de reciclarse. Para los RCD mixtos estimaremos un porcentaje de reciclaje del 15% [51], que es una estimación actual que está muy por debajo de los objetivos tanto nacionales como europeos. Así, el objetivo para España es del 40% para 2011 [52] y para la Unión Europea del 70% para 2020 [53].

%SE<sub>x</sub>: porcentaje de energía recuperada por reciclaje.

	Orgánico	Papel	Plástico	Vidrio	Tierras excav.	RCD mixtos
IE <sub>x</sub> (GJ/t)	20	30	43,75	20	0,10	5
PE (GJ/ha)	71	71	71	71	71	71
%R <sub>x</sub>	13	50	40	40	80	15
%SE <sub>x</sub>	100	50	70	40	90	90
FE (hag/ha)	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34
PN (t/ha)		1,01				

Tabla 9: parámetros para el cálculo de los índices de conversión

Dicha formulación se aplicaría a todos los residuos como huella por energía fósil, salvo para el papel y cartón. En el caso de los residuos de papel y cartón, a la huella por “energía fósil” hay que añadir la “huella por bosque”, por lo cual, para obtener su índice de conversión hay que considerar la siguiente ecuación [48]:

$$IC_x = \frac{IE_x}{PE} * (1 - \frac{\%R_x}{100} * \frac{\%SE_x}{100}) * FE_F + \frac{1}{PN} * (1 - \frac{\%R_x}{100} * 0,8) * FE_B \quad (18)$$

Donde cada uno de esos términos es:

PN: productividad natural del papel. Se considera 1,01 t/ha y año [29] (tabla 9).

%Rx: porcentaje de reciclaje de x (tabla 9).

0,8 sería el factor de corrección análogo al SE de la fórmula anterior, que de alguna manera dice la productividad que puedo recuperar con el papel reciclado (alrededor del 80%).

Finalmente, para determinar la huella total de los residuos se usará la expresión:

$$HE_{pr} = \sum_i IC_{x_i} * C_i \quad (19)$$

Donde:

HEpr: huella ecológica ponderada de los residuos (hag)

ICxi: índice de conversión ponderado (hag/t)

Ci: consumo (t)

Resumiendo, el procedimiento a seguir sería el siguiente:

1. Determinación de los pesos generados de RSU y RCD. Tendremos en total seis tipos de residuos: orgánicos, papel, plástico, vidrio, tierras de excavación y RCD mixtos. Dichos cálculos se basarán en datos estadísticos [50,54] o herramientas informáticas [46,55].
2. Determinación de los índices de conversión (IC) para cada uno de los residuos considerados, siguiendo la formulación comentada.
3. Cálculo de la HE de los residuos (procedente de huella forestal y energética).

### 3.7.- Determinación de la huella de superficie construida

La HE de planificación, implantación, ocupación directa o de forma menos ambigua, de superficie construida, vendrá dada por la transformación sufrida por el suelo a analizar.

Dicha huella se obtendrá calculando la superficie consumida por la urbanización y la edificación que estemos analizando, a través de la memoria de cada proyecto analizado. No tendremos que aplicar ningún factor de conversión ya que las unidades que obtendremos serán de superficie, sólo tendremos que convertir la superficie de m<sup>2</sup> a ha. Tal como define la metodología de huella ecológica, la superficie a computar se dará en la forma "Superficie productiva utilizada directamente".

El cálculo de la HE en términos globales sería:

$$HE_{ps} = S * FE_{sc} \quad (20)$$

Donde:

HEps: HE ponderada de ocupación directa (hag)

S: superficie consumida (ha)

FESC: factor de equivalencia de la superficie construida

El territorio utilizado directamente se considera que tiene la productividad de un suelo agrícola, dado que la mayoría de las infraestructuras y espacio construido están ubicados en zonas de calidad agrícola. Aunque esta afirmación es excesivamente generalista, en este caso debemos seguir las hipótesis de HE, ya que no podemos modificar los factores de equivalencia.

#### 4.- Resultados

##### 4.1.- Huella derivada del consumo de energía

Para el consumo de combustible empleado por la maquinaria, determinamos, mediante las mediciones y el presupuesto, el consumo de dicha maquinaria. Los resultados aparecen en la tabla 10:

	Presupuesto (€)	HE consumo combustible (hag)
Maquinaria edificación	167.708,63	
Maquinaria urbanización	16.588,42	
Maquinaria indirectos	71.152,76	
Total	255.449,81	147,84

Tabla 10: Presupuesto global y huella ecológica de maquinaria de la obra

Para el consumo de energía eléctrica, partimos del presupuesto global (tabla 3). Mediante las fórmulas polinómicas [38,39] calculamos el porcentaje de ese presupuesto que corresponde al consumo de energía. Como hemos calculado el consumo de energía para maquinaria, la diferencia entre consumo de energía y consumo de combustible es el consumo de energía eléctrica.

El dato del consumo de energía eléctrica en kWh se obtendrá a partir del modelo de facturación de la electricidad que emplea la empresa suministradora.

La obtención de la huella de la energía eléctrica requerirá conocer el origen de la energía eléctrica en España [56]. Sólo se considerará, tal y como se explicó anteriormente, la huella procedente de combustibles fósiles y de la energía nuclear. Los resultados aparecen en la tabla 11.

Consumo energía eléctrica (kWh)	2.322.194,11
Consumo energía eléctrica (GJ)	8.359,90
Rendimiento instalaciones	0,30
Consumo energía primaria (GJ)	27.866,33
Huella energía eléctrica (fósil) (hag)	417,59

Tabla 11: Huella ecológica correspondiente a la energía eléctrica

##### 4.2.- Huella derivada del consumo de agua

Siguiendo la metodología comentada, los resultados de consumo fueron 2.599,48 m<sup>3</sup>, lo que originó una huella de agua (bosques) de 2,32 hag.

##### 4.3.- Huella vinculada al consumo de alimentos

En primer lugar se calculó el número total de horas trabajadas por la mano de obra para la totalidad de la obra, obtenidas a través de la medición del proyecto. Dicha

mano de obra se desglosó según la Clasificación Sistemática del BCCA [36]. Igualmente de dicha Clasificación se obtuvo el coste de la mano obra (unidad monetaria/h). Los resultados aparecen en la tabla 12:

	Horas	Coste (euros)
Mano obra edificación	98.686,05	1.470.946,35
Mano obra urbanización	4.280,57	62.590,07
Mano obra SS edificación	604,46	8.752,26
Mano obra SS urbanización	10,93	158,29
Mano obra indirectos	15.836,82	264.474,95
Total	119.418,84	1.806.921,92

Tabla 12: Coste total de la mano de obra

Posteriormente, se obtuvieron las HEc de los distintos alimentos que conforman la comida diaria del trabajador, empleando los datos de la tabla 7. Los resultados se muestran en la figura 3:

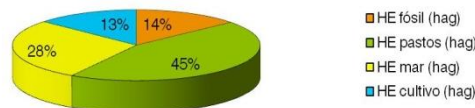


Figura 3: Huella ecológica ponderada de los distintos alimentos (%)

#### 4.4.- Huella de movilidad

Siguiendo las pautas planteadas anteriormente, se obtuvo una huella de movilidad, lógicamente de origen fósil, de 0,03 hag.

#### 4.5.- Huella de materiales de construcción

Se determinó la energía total incorporada (Et) tanto para edificación como para urbanización, y cuyos resultados fueron respectivamente, 114.521.390,01 MJ y 10.313.394,16 MJ. La energía total incorporada fue 124.834.784,18 MJ. Calculada la energía total incorporada en el proceso de construcción de la edificación y la urbanización, la huella de los materiales se determinó siguiendo la metodología propuesta, dando un resultado de HE de consumo de materiales (fósil) de 2.356,04 hag.

#### 4.6.- Huella de los residuos

Se determinaron los RSU y RCD generados mediante bases de datos estadísticas y herramientas informáticas. Los índices de conversión se calcularon siguiendo la metodología propuesta. Para el caso de los residuos de construcción, mediante las herramientas informáticas se obtuvieron 22.400 m<sup>3</sup> de tierras excavadas, de las que se reutilizaron el 50%, y 1920 m<sup>3</sup> de RCD mixtos. Se consideró una densidad media de 1,2 t/m<sup>3</sup> para las tierras de excavación y de 1,00 t/m<sup>3</sup> para los RCD mixtos. Los resultados se recogen en la tabla 13:

	Orgánico	Papel	Plástico	Vidrio	Tierras excav.	RCD mixtos	HE total residuos
C (t)	17,709	8,452	4,427	2,817	13440	1920	
IC (hag/t)	0,3284	1,2207	0,5945	0,3171	0,0005	0,0816	
HE (fósil) (hag)	5,82	10,32	2,63	0,89	7,10	156,72	183,48

Tabla 13: HE de los residuos

#### 4.7.- Huella de superficie construida

Para este apartado hay que indicar la superficie consumida total en planta. Para ello, se computaron las parcelas correspondientes a los bloques de viviendas y la superficie correspondiente a viario, obteniéndose una superficie total de 7.123,78 m<sup>2</sup> (0,7124 ha). Se considera un factor de equivalencia de 2,21 hag/ha, dando lugar a una HE de superficie construida de 1,57 hag.

#### 4.8. Huella total

En las tablas 14 y 15 se muestran los resultados totales, expresados en hag/año y hag/año y m<sup>2</sup>. En la tabla 15, la superficie construida considerada es la de los bloques de viviendas, no la del suelo urbanizado. Por tanto, el dato empleado será 10.243,69 m<sup>2</sup> (tabla 1).

Impacto	Tipo huella (hag/año)					
	Fósil	Bosques	Pastos	Mar	Cultivos	Suelo urbanizado
Maquinaria	147,84					
Electricidad	417,59					
Agua		2,32				
Alimentos	114,75		372,50	231,63	111,50	
Movilidad	0,03					
Materiales	2.357,77					
Residuos	183,48					
Ocupación directa						1,57
Total	3.219,73	2,32	372,50	231,63	111,50	1,57
TOTAL	3.939,26					

Tabla 14: HE total

Impacto	Tipo huella (hag/año y m <sup>2</sup> )					
	Fósil	Bosques	Pastos	Mar	Cultivos	Suelo urbanizado
Maquinaria	0,014432					
Electricidad	0,040766					
Agua		0,000227				
Alimentos	0,011202		0,036364	0,022612	0,010885	
Movilidad	0,000003					
Materiales	0,229999					
Residuos	0,017912					
Ocupación directa						0,000154
Total	0,314314	0,000227	0,036364	0,022612	0,010885	0,000154
TOTAL	0,384555					

Tabla 15: HE total (respecto a la superficie construida)

## 5.- Conclusiones

1. Los estudios de huella ecológica están centrados fundamentalmente a escala urbana, lo que dificulta la búsqueda de información extrapolable a escala edificio. Además, es complicado definir las unidades de medición del indicador para los edificios, debido a las particularidades de la actividad constructiva. Por otra parte, la dependencia de los análisis respecto a tablas y gráficos hace necesario la revisión periódica de los mismos.
2. Se considera necesario profundizar en los aspectos más novedosos de la investigación, tales como los impactos generados por el consumo de agua, el estudio de la energía incorporada de los materiales de construcción y la generación de residuos.
3. Se ha constatado la dificultad de establecer un presupuesto global de proyecto ajustado a una base de costes, en este caso la BCCA, ya que la mayoría de las empresas constructoras suelen disponer de bases de costes propias. Además, el cálculo del presupuesto global ha hecho necesario determinar Costes Directos e Indirectos de forma completa, con la dificultad posterior de la integración de dichos costes dentro de la metodología de cálculo del indicador, ya que la bibliografía relativa a huella ecológica siempre ha obviado el cálculo de Costes Indirectos asociados a cualquier actividad empresarial.
4. La consideración del factor temporal se ha demostrado fundamental, ya que condiciona hipótesis de análisis a lo largo de toda la metodología. Además, asumir como unidad de cálculo hag/año permite mayor generalización de los resultados.
5. Atendiendo a los resultados globales, es claramente destacable que el tipo de huella más representativa es la de origen fósil. Dentro de ella, es muy significativo el efecto del consumo de materiales de construcción. Para este tipo de actividad la movilidad no resulta ser un aspecto muy determinante. Las otras fuentes de la huella fósil son la maquinaria, la electricidad y los alimentos. Respecto a este último, decir

que su cálculo implica asumir unas hipótesis que derivan en resultados algo chocantes. Así, el consumo de alimentos origina huella de distintos tipos, conforme al origen de los distintos alimentos, y además todas ellas suficientemente representativas. Por último, la huella del consumo de agua y territorio tienen una incidencia poco apreciable en este estudio. Todos estos resultados exigirán su revisión futura para la mejora del modelo mostrado.

## REFERENCIAS

- [1] Baño Nieva, A., Vigil-Escalera del Pozo, A., 2005. Guía de construcción sostenible. Instituto sindical de Trabajo, Ambiente y Salud (ISTAS), España. <http://www.ecohabitar.org/PDF/CCConsSost.pdf> (acceso 15.07.11).
- [2] Solanas, T., Herreros, J., 2008. Vivienda y sostenibilidad en España. Vol 2: Colectiva. Editorial Gustavo Gili. Barcelona, España.
- [3] Zabalza Bribián, I., Valero Capilla, A., Aranda Usón, A., 2011. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment* 46, 1133-1140.
- [4] Malmqvist, T., Glaumann, M., 2009. Environmental efficiency in residential buildings – A simplified communication approach. *Building and Environment* 44, 937–947.
- [5] Chambers N., Simmons C., Wackernagel M., 2004. *Sharing Nature's Interest: Ecological Footprints as an Indicator of Sustainability*. Sterling Earthscan. London, Great Britain.
- [6] WWF (WWF International), Global Footprint Network, ZSL (Zoological Society of London), 2008. *Living Planet Report 2008*. WWF, Gland, Switzerland. ISBN 978-2-88085-292-4. <http://assets.panda.org/downloads/lpr2008.pdf> (acceso 10.08.11).
- [7] WWF (WWF International), Global Footprint Network, ZSL (Zoological Society of London), 2010. *Living Planet Report 2010*. WWF, Gland, Switzerland. ISBN 978-2-940443-08-6. <http://assets.panda.org/downloads/lpr2010.pdf> (acceso 10.08.11).
- [8] Galli, A., Wiedmann, T., Ercin, E., Knoblauch, D., Ewing, B., Giljum, S., 2011. Integrating Ecological, Carbon and Water footprint into a “Footprint Family” of indicators: Definition and role in tracking human pressure on the planet. *Ecological Indicators*, in press, doi:10.1016/j.ecolind.2011.06.017.
- [9] Meadows D.H., Randers J., Meadows D.L., 2006. *Los Límites del Crecimiento 30 Años después*. Galaxia Gutenberg. Barcelona, España.
- [10] WWF (WWF International), Global Footprint Network, ZSL (Zoological Society of London), 2006. *Living Planet Report 2006*. WWF, Gland, Switzerland. ISBN 2-88085-272-2. <http://assets.panda.org/downloads/lpr2006.pdf> (acceso 10.08.11).
- [11] Fricker, A., 1998. The ecological footprint of New Zealand as a step towards sustainability. *Futures* 30, 559–567.
- [12] Lenzen, M., Murray, S.A., 2001. A modified ecological footprint method and its application to Australia. *Ecological Economics* 37, 229–255.
- [13] Medved, S., 2006. Present and future ecological footprint of Slovenia — the influence of energy demand scenarios. *Ecological Modelling* 192, 25–36.
- [14] van Vuuren, D.P., Smeets, E.M.W., 2000. Ecological footprints of Benin, Bhutan, Costa Rica and the Netherlands. *Ecological Economics* 34, 115–130.
- [15] von Stokar, T., Steinemann, M., Rügge, B. and Schmill, J., 2006. *Switzerland's ecological footprint: A contribution to the sustainability debate*. Published by Federal Office for Spatial Development (ARE), Agency for Development and Cooperation (SDC), Federal Office for the Environment (FOEN), Federal Statistical Office (FSO), Neuchâtel.
- [16] Wackernagel, M., Monfreda, C., Erb, K.-H., Haberl, H., Schulz, N.B., 2004. Ecological footprint time series of Austria, the Philippines, and South Korea for 1961–1999: comparing the conventional approach to an ‘actual land area’ approach. *Land Use Policy* 21, 261–269.
- [17] Barrett, J., Vallack, H., Jones, A., Haq, G., 2002. *A material flow analysis and ecological footprint of York*. Technical Report. Stockholm Environment Institute, Stockholm, Sweden.

- [18] Acosta Bono, G., González Daimiel, J., Calvo Salazar, M., Sancho Royo, F., 2001. Estimación de la Huella Ecológica en Andalucía y Aplicación a la Aglomeración Urbana de Sevilla. Dirección General de Ordenación del Territorio y Urbanismo, Consejería de Obras Públicas de la Junta de Andalucía, Sevilla, España. ISBN 84-8095-270-9. <http://hdl.handle.net/10326/974> (acceso 15.07.11).
- [19] Li, D.Z., Hui, E.C.M., Leung, B.Y.P., Li, Q.M., Xu, X., 2010. A methodology for eco-efficiency evaluation of residential development at city level. *Building and Environment* 45, 566–573.
- [20] Kuzyk, L.W., 2011. The ecological footprint housing component: A geographic information system analysis. *Ecological Indicators*, in press, doi:10.1016/j.ecolind.2011.03.009.
- [21] Gössling, S., Borgström Hansson, C., Horstmeier, O., Saggel, S., 2002. Ecological footprint analysis as a tool to assess tourism sustainability. *Ecological Economics* 43, 199–211.
- [22] Hunter, C., Shaw, J., 2007. The ecological footprint as a key indicator of sustainable tourism. *Tourism Management* 28, 46–57.
- [23] Peeters, P., Schouten, F., 2006. Reducing the ecological footprint of inbound tourism and transport to Amsterdam. *Journal of Sustainable Tourism* 14, 157–171.
- [24] Holden, E., Høyer, K.G., 2005. The ecological footprints of fuels. *Transportation Research Part D* 10, 395–403.
- [25] Herva, M., Franco, A., Ferreiro, S., Álvarez, A., Roca, E., 2008. An approach for the application of the ecological footprint as environmental indicator in the textile sector. *J.Hazard.Mater.* 156, 478–487.
- [26] Herva, M., García-Diéguez, C., Franco-Uría, A., Roca, E., 2011. New insights on ecological footprinting as environmental indicator for production processes. *Ecological Indicators*, in press, doi:10.1016/j.ecolind.2011.04.029.
- [27] Frey, S.D., Harrison, D.J., Billett, E.H., 2006. Ecological footprint analysis applied to mobile phones. *J.Ind.Ecol.* 10(1–2), 199–216.
- [28] Niccolucci, V., Galli, A., Kitzes, J., Pulselli, R.M., Borsa, S., Marchettini, N., 2008. Ecological footprint analysis applied to the production of two Italian wines. *Agric. Ecosyst. Environ.* 128, 162–166.
- [29] Domenech Quesada, J.L., 2007. *Huella Ecológica y Desarrollo Sostenible*. AENOR. Madrid, España.
- [30] Holden, E., 2004. Ecological Footprints and Sustainable Urban Form. *Journal of Housing and the Built Environment* 19, 91–109.
- [31] Nye, M., Rydin, Y., 2008. The Contribution of Ecological Footprinting to Planning Policy Development: Using REAP to Evaluate Policies for Sustainable Housing Construction. *Environment and Planning B: Planning and Design* 35(2) 227 – 247.
- [32] Cagiao, J., Gómez, B., Domenech, J.L., Gutiérrez Mainar, S., Gutiérrez Lanza, H. 2011. Calculation of the corporate carbon footprint of the cement industry by the application of MC3 methodology. *Ecological Indicators* 11, 1526–1540.
- [33] Solís-Guzmán, J., 2011. Evaluación de la huella ecológica del sector edificación (uso residencial) en la comunidad andaluza. Tesis Doctoral. Sevilla, España.
- [34] Mercader, P., 2010. Cuantificación de los recursos consumidos y emisiones de CO2 producidas en las construcciones de Andalucía y sus implicaciones en el Protocolo de Kyoto. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla, Sevilla, España.
- [35] Mercader, P., Marrero, M., Solís-Guzmán, J., Montes, M. V., Ramírez de Arellano, A., 2010. Cuantificación de los recursos materiales consumidos en la ejecución de la Cimentación (Quantification of material resources consumed during concrete slab construction). *Informes de la Construcción*, 62, 125–132.
- [36] Base de Costes de la Construcción de Andalucía, 2008. Consejería de Obras Pública y Vivienda de la Junta de Andalucía (BCCA). 2008. <http://www.juntadeandalucia.es/obraspublicasyvivienda/portalweb/web/areas/vivienda/texto/bcfbb3af-ee3a-11df-b3d3-21796ae5a548>. (acceso 15.11.10).
- [37] Marrero, M., Ramirez-de-Arellano, A., 2010. The building cost system in Andalusia: application to construction and demolition waste management. *Construction Management and Economics*, 28, 495–507.



- [38] Ministerio de la Presidencia (España), 1970. Real Decreto 3650/1970, de 19 de Diciembre, por el que se aprueba el cuadro de fórmulas-tipo generales de revisión de precios de los contratos de obras del Estado y Organismos autónomos para el año 1971. Madrid, España.
- [39] Ministerio de la Presidencia (España), 1981. Real Decreto 2167/1981, de 20 de agosto, por el que se complementa el Decreto 3650/1970, de 19 de diciembre, sobre fórmulas-tipo generales de revisión de precios de los contratos de obras del Estado y Organismos autónomos.
- [40] Wackernagel, M., Rees, W., 1996. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth. New Society, Gabriola Island, British Columbia.
- [41] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2007. Guía Práctica de la Energía: Consumo Eficiente y Responsable. IDAE. Madrid, España. [http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos\\_11406\\_Guia\\_Practica\\_Energia\\_3ed\\_A2010\\_509f8287.pdf](http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_11406_Guia_Practica_Energia_3ed_A2010_509f8287.pdf). (acceso 15.08.11).
- [42] Berge, B., 2009. The Ecology of Building Materials. Architectural Press. Amsterdam, Holanda.
- [43] Dirección General de la Vivienda, la Arquitectura y el Urbanismo (DGVAU), Institut Cerdá, IDAE, 1999. Guía de la Edificación Sostenible, Calidad Energética y Medio Ambiental en Edificación. Ministerio de Fomento. Madrid, España.
- [44] ITEC, 2005. Metabase-TCQ 2000: Datos Ambientales. ITEC. Barcelona, Cataluña. <http://www.itec.es/programas/tcq/> (acceso 15.08.11).
- [45] Cuchí, A., 2005. Arquitectura i Sostenibilitat. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Barcelona, España.
- [46] Solís-Guzmán, J., Marrero, M., Montes-Delgado, M.V., Ramírez-de-Arellano, A., 2009. A Spanish Model for Quantification and Management of Construction Waste. Waste Management 29 (9) 2542-2548.
- [47] Wackernagel, M., Dholakia, R., Deumling, D. and Richardson, D. 2000. Redefining Progress, Assess your Household's Ecological Footprint v 2.0. [http://greatchange.org/ng-footprint-ef\\_household\\_evaluation.xls](http://greatchange.org/ng-footprint-ef_household_evaluation.xls). (acceso 10.08.11).
- [48] Marañón, E., Iregui G., Domenech J.L., Fernández Nava Y., González M., 2008. Propuesta de índices de conversión para la obtención de la huella de los residuos y los vertidos. Observatorio iberoamericano del desarrollo local y la economía social, 4 (1). (Abril-Junio 2008).
- [49] Observatorio de la Sostenibilidad en España (OSE), 2008. Sostenibilidad en España 2007. <http://www.sostenibilidad-es.org> (acceso 15.08.11).
- [50] Consejería de Medio Ambiente de Andalucía, 2009. Informe de Medio Ambiente 2008. <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/web/menuitem.318ffa00719ddb10e89d04650525ea0/?vgnnextoid=3b32db0dee134210VgnVCM1000001325e50aRCRD>. (acceso 15.08.11).
- [51] Gremio de Entidades del Reciclaje de Derrivos (GERD), 2009. IV Congreso Nacional de Demolición y Reciclaje. Zaragoza, España. <http://www.congresorcd.com/ponencias.cfm>. (acceso 15.08.11).
- [52] Ministerio de Medio Ambiente, 2008. II Plan Nacional de Residuos 2008-2015. Madrid, España.
- [53] Unión Europea, 2008. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. European Community. Brussels, Belgium.
- [54] Ministerio de Medio Ambiente, 2001. Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006. Madrid, España.
- [55] Ramírez-de-Arellano Agudo, A., Solís-Guzmán J., Pérez Monge J., 2008. Generación de RCD versión 2.0 (Software de Evaluación de RCD para Tramitación de Licencias Municipales). Universidad de Sevilla, España.
- [56] Ministerio de Industria (España), 2008. Estructura de generación eléctrica en España. La Energía en España 2007. [http://www.aven.es/pdf/la\\_energia\\_en\\_espana\\_2007.pdf](http://www.aven.es/pdf/la_energia_en_espana_2007.pdf) (acceso 15.08.11).