

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO PASIVO DEL PARQUE EDIFICATORIO RESIDENCIAL EXISTENTE CONSIDERANDO SU CONTEXTO URBANO

Tesis Doctoral

Autora: Marta Braulio Gonzalo
Directoras: M^a José Ruá Aguilar
M^a Dolores Bovea Edo

**Propuesta metodológica para la caracterización
del comportamiento energético pasivo del
parque edificatorio residencial existente
considerando su contexto urbano**

TESIS DOCTORAL

Autora: Marta Braulio Gonzalo

Directoras: M^a José Ruá Aguilar

M^a Dolores Bovea Edo



Castellón de la Plana, 2016

Quiero dar mi más sincero agradecimiento a mis directoras de tesis, M^º José y Loles, por guiarme durante esta investigación, por vuestros valiosos consejos y por vuestra disponibilidad y dedicación. Sois para mí un referente y un ejemplo a seguir. Muchas gracias por todo.

A Pablo Juan, a quien también dedico una especial mención. Sense la teua col·laboració i aportacions, aquest treball no hauria estat possible. Gràcies per la teua implicació.

A Fernando, por creer en mí y apoyarme siempre en aquello por lo que lucho. Por tu paciencia, por levantarme el ánimo incontables veces y por sacarme siempre una sonrisa.

A mis padres, por vuestro apoyo incondicional y cariño, por enseñarme a superarme cada día desde niña y, porque gracias a vosotros, hoy soy quien soy.

A mis compañeros de Departamento y del Área de Construcciones Arquitectónicas, por vuestro asesoramiento cuando os lo he solicitado. A Dani, por tu ayuda con los bloqueos informáticos y tus ánimos para comenzar este trabajo y seguir adelante.

Y a todos aquellos que, de algún modo u otro, me habéis dedicado gestos de ánimo durante el desarrollo de esta tesis.

El sector de la edificación ha experimentado un gran crecimiento en las últimas décadas, dejando un extenso parque residencial de edificios que ha contribuido a desarrollar y dar forma a la ciudad. La legislación en materia de eficiencia energética empezó a desarrollarse en la década de 1970, coincidiendo con el fin de la etapa de mayor crecimiento del sector. Como consecuencia, gran parte del actual parque de viviendas se encuentra alejado de los estándares promovidos por dicha legislación, provocando que su uso sea responsable de un alto porcentaje del consumo global de energía. Ante esta situación, la evolución de legislación se ha orientado en estos últimos años hacia la intervención en la ciudad consolidada e impulsa, desde la iniciativa de las administraciones públicas, la rehabilitación edificatoria y la regeneración urbana con el objetivo de promover un desarrollo urbano más sostenible.

Con ello, surge la necesidad de desarrollar instrumentos que proporcionen ayuda durante la toma de decisiones a administraciones locales y a otros agentes involucrados en los procesos de regeneración urbana. Así, esta tesis propone una metodología para caracterizar el comportamiento energético pasivo del parque edificatorio residencial existente considerando su contexto urbano, de forma que permita realizar un diagnóstico energético de áreas urbanas consolidadas e identificar aquellas con mayor vulnerabilidad energética.

La revisión del estado del arte en relación con las herramientas de evaluación de la sostenibilidad urbana y las metodologías de evaluación energética desarrolladas hasta la fecha, ha permitido identificar por un lado, un conjunto de indicadores para evaluar el comportamiento energético pasivo del parque edificatorio residencial (demanda energética de refrigeración (DE_r) y de calefacción (DE_c) y horas de desconfort térmico en verano (HD_v) e invierno (HD_i)) y, por otro, un conjunto de covariables que influyen en dicho comportamiento, tanto a nivel de edificio (factor de forma (S/V) y año de construcción (A)) como a nivel urbano (manzana urbana (MU), proporción de calle (H/W) y orientación (O)). Ello permite integrar la perspectiva urbana en la propuesta metodológica, confiriéndole a la misma un enfoque holístico que no se centra únicamente en el edificio como elemento individual y aislado.

La metodología se compone de cuatro etapas. En la Etapa I se establece el procedimiento para caracterizar la taxonomía urbana en cuatro escalas: la ciudad, el barrio, la manzana urbana residencial y el edificio. El análisis del Plan General de Ordenación Urbana (PGOU), la cartografía y la información catastral de la ciudad donde se implemente la metodología, será necesario para clasificar los elementos urbanos en las cuatro escalas anteriores. El uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite crear una base de datos georreferenciada para tratar dicha información, que se utilizará también en etapas posteriores. Como resultado de esta etapa se obtiene la definición de las covariables y un conjunto de edificios representativos del área urbana.

En la Etapa II de la metodología se realiza la evaluación energética de los edificios representativos previamente identificados. Mediante la combinación de las covariables se obtiene un conjunto de hipótesis de cálculo que serán objeto de simulación dinámica. Como resultado, se obtienen los valores de los indicadores energéticos para cada una de las hipótesis planteadas, que constituirán los datos de entrada en la siguiente etapa.

La Etapa III tiene como objeto la modelización estadística de los resultados de la evaluación energética mediante la metodología *Integrated Nested Laplace Approximation* (INLA), basada en la estadística Bayesiana. El tratamiento estadístico de los datos permite obtener un conjunto de cuatro ecuaciones matemáticas para predecir los indicadores energéticos de un área urbana, teniendo en

cuenta el efecto de todas las covariables. Además, ello permite identificar la significancia de las mismas y su efecto sobre los indicadores energéticos.

En la Etapa IV, el diagnóstico energético es extrapolado desde la escala de edificio a la escala urbana, siguiendo un enfoque *bottom-up*, de manera que los cuatro indicadores pueden ser determinados para cada edificio que compone un área urbana objeto de estudio. A través del entorno SIG, los resultados son representados en mapas urbanos energéticos, los cuales proporcionan la interfaz gráfica a la metodología.

Por último, la propuesta metodológica se implementa en la ciudad de Castellón de la Plana, seleccionada como caso de estudio. Los resultados muestran el diagnóstico energético de todo un barrio que, representados en mapas urbanos energéticos, permiten identificar con facilidad aquellas zonas urbanas que tienen asociado un peor comportamiento y que requieren con mayor urgencia intervenciones de rehabilitación. El análisis en profundidad de la influencia de las covariables sobre los indicadores que evalúan el comportamiento energético pasivo del parque edificatorio residencial, permite sugerir ciertas estrategias que podrían ser implementadas a nivel de barrio existente y también a nivel de nuevos desarrollos urbanos, con el fin de conseguir ahorros energéticos y mejorar el confort térmico de sus habitantes.

El sector de l'edificació ha experimentat un gran creixement en les últimes dècades, deixant un extens parc residencial d'edificis que ha contribuït a desenvolupar i donar forma a la ciutat. La legislació en matèria d'eficiència energètica va començar a desenvolupar-se en la dècada de 1970, coincidint amb la fi de l'etapa de major creixement del sector. Com a conseqüència, gran part de l'actual parc d'habitatges es troba allunyat dels estàndards promoguts per aquesta legislació, provocant que el seu ús siga responsable d'un alt percentatge del consum global d'energia. Davant d'aquesta situació, l'evolució de legislació s'ha orientat en aquests últims anys cap a la intervenció en la ciutat consolidada i impulsa, des de la iniciativa de les administracions públiques, la rehabilitació edificatòria i la regeneració urbana amb l'objectiu de promoure un desenvolupament urbà més sostenible .

Arran d'això, sorgeix la necessitat de desenvolupar instruments que proporcionen ajuda durant la presa de decisions a administracions locals i altres agents involucrats en els processos de regeneració urbana. Així, aquesta tesi proposa una metodologia per a caracteritzar el comportament energètic passiu del parc edificatori residencial existent considerant el seu context urbà, de manera que permeti realitzar un diagnòstic energètic d'àrees urbanes consolidades i identificar aquelles amb major vulnerabilitat energètica.

La revisió de l'estat de l'art relativa a les ferramentes d'avaluació de la sostenibilitat urbana i les metodologies d'avaluació energètica desenvolupades fins a la data, ha permès identificar, d'una banda, un conjunt d'indicadors per tal d'avaluar el comportament energètic passiu del parc edificatori residencial (demanda energètica de refrigeració (DE_r) i de calefacció (DE_c) i hores de disconfort tèrmic en estiu (HD_v) i en hivern (HD_i) i, d'altra, un conjunt de covariables que influeixen en aquest comportament, tant a escala d'edifici (factor de forma (S/V) i any de construcció (A)) com a escala urbana (mansana urbana (MU), proporció de carrer (H/W) i orientació (O)). Això permet integrar la perspectiva urbana en la proposta metodològica, conferint a la mateixa un enfocament holístic que no se centra únicament en l'edifici com a element individual i aïllat.

La metodologia es compon de quatre etapes. En l'Etapa I s'estableix el procediment per caracteritzar la taxonomia urbana en quatre escales: la ciutat, el barri, la mansana urbana residencial i l'edifici. L'anàlisi del Pla General d'Ordenació Urbana (PGOU), la cartografia i la informació cadastral de la ciutat on s'implemente la metodologia, serà necessari per classificar els elements urbans en les quatre escales anteriors. L'ús de Sistemes d'Informació Geogràfica (SIG) permet crear una base de dades georeferenciada per tractar aquesta informació, la qual serà utilitzada també en etapes posteriors. Com a resultat d'aquesta etapa s'obté la definició de les covariables i un conjunt d'edificis representatius de l'àrea urbana.

En l'Etapa II de la metodologia es realitza l'avaluació energètica dels edificis representatius prèviament identificats. En combinar les covariables s'obté un conjunt d'hipòtesis de càlcul que seran objecte de simulació dinàmica. Com a resultat, s'obtenen els valors dels indicadors energètics per a cadascuna de les hipòtesis plantejades, que constituïran les dades d'entrada a la següent etapa.

L'Etapa III té com a objecte la modelització estadística dels resultats de l'avaluació energètica mitjançant la metodologia *Integrated Nested Laplace Approximation* (INLA), basada en l'estadística Bayesiana. El tractament estadístic de les dades facilita obtenir un conjunt de quatre equacions matemàtiques per predir els indicadors energètics d'una àrea urbana, tenint en compte l'efecte de

totes les covariables. A més, això permet identificar la significança d'aquestes i el seu efecte sobre els indicadors energètics.

En l'Etapa IV, el diagnòstic energètic és extrapolat des de l'escala d'edifici a l'escala urbana, seguint un enfocament *bottom-up*, de manera que els quatre indicadors poden ser determinats per a cada edifici que compon una àrea urbana objecte d'estudi. A través de l'entorn SIG, els resultats són representats en mapes urbans energètics, els quals proporcionen la interfície gràfica a la metodologia.

Finalment, la proposta metodològica s'implementa a la ciutat de Castelló de la Plana, seleccionada com a cas d'estudi. Els resultats mostren el diagnòstic energètic de tot un barri que, representats en mapes urbans energètics, permeten identificar amb facilitat aquelles zones urbanes que tenen associat un pitjor comportament i que requereixen amb major urgència intervencions de rehabilitació. L'anàlisi en profunditat de la influència de les covariables sobre els indicadors que avaluen el comportament energètic passiu del parc edificatori residencial, permet suggerir certes estratègies que podrien ser implementades a nivell de barri existent i també a nivell de nous desenvolupaments urbans, per tal d' aconseguir estalvis energètics i millorar el confort tèrmic dels seus habitants.

The building sector has rapidly grown in recent decades, and has left a large residential building stock that has influenced city development. Legislation on energy efficiency began in the 1970s, and coincided with the end of the period of densest growth in the sector. Consequently, much existing housing stock is now far from the standards promoted by this legislation, which means that the building sector is responsible for a high percentage of overall energy consumption. To face this situation, legislation in recent years has focused on intervention in consolidated cities and, in line with government initiatives, promotes building renovation and urban regeneration to achieve more sustainable urban development.

Consequently, the need to develop tools that support decision making for local authorities and other actors involved in urban regeneration processes has emerged. This PhD proposes a methodology for characterising the passive energy performance of the existing residential building stock by considering its urban context to make an energy diagnosis of consolidated urban areas and to identify those with the greatest energy vulnerability.

The review of the state of the art on the urban sustainability assessment tools and energy assessment methodologies developed to date has allowed two main aspects to be identified. On the one hand, a set of indicators to assess the passive energy performance of the residential building stock (energy demand for cooling (DE_c) and heating (DE_h) and thermal discomfort hours in summer (HD_s) and winter (HD_w)). On the other hand, a set of covariates that influences these indicators, on both the building scale (form factor (S/V) and year of construction (A)) and the urban scale (urban block (MU), proportion of street (H/W) and orientation (O)). This allows the urban perspective to be included in the methodology, and provides a holistic approach that focuses on the building as an individual and isolated element.

The methodology comprises four stages. Stage I establishes the procedure to characterise urban taxonomy on four scales: city, neighbourhood, residential block and building. The analysis of the land-use plan, cartography and cadastral information of the city where the methodology is implemented is necessary to classify urban elements on the four scales above. Use of Geographic Information Systems (GIS) enables a geo-referenced database to be created to process such information, which will be used in later stages. As a result of this stage, the definition of covariates and a set of representative buildings of the urban area are obtained.

In Stage II of the methodology, an energy assessment of the previously identified representative buildings is made. By combining covariates, a set of calculation hypotheses is obtained, which would be subjected to dynamic simulation. As a result, the values of the energy indicators for each hypothesis are obtained, which constitute the input data in the next methodology stage.

Stage III involves the statistical modelling of the energy assessment results, following the *Integrated Nested Laplace Approximation* (INLA) methodology based on Bayesian statistics. Statistical data processing allows a set of four mathematical equations to be obtained, to be used to predict the energy indicators of an urban area by considering the effect of all the covariates. This also allows the identification of the significance of covariates and their effect on energy indicators.

In Stage IV, the energy diagnosis is extrapolated from the building scale to the urban scale by a bottom-up approach so that the four indicators can be determined for each building that comprises an urban area under study. Through the GIS environment, the results can be represented on urban energy maps, which provide a graphical interface to the methodology.

Finally, the methodology was implemented in the city of Castellon de la Plana (east Spain), selected as a case study. The results showed the energy diagnosis of an entire neighbourhood represented on urban energy maps, which allowed us to easily identify those urban areas with a related deficient energy performance and which required urgent renovation interventions. The in-depth analysis of the influence of covariates on energy indicators enabled a set of strategies to be suggested, which could be implemented to existing neighbourhoods and to new urban developments to not only achieve energy savings, but to also improve its inhabitants' thermal comfort.

ABREVIATURAS

A: Año de construcción

ACS: Agua Caliente Sanitaria

ASHRAE: *American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers*

BCN: *Sistema Municipal d'Indicadors de Sostenibilitat de la Diputació de Barcelona*

BIL: Indicadores de Sostenibilidad de Bilbao

BREEAM: *Building Research Establishment Environmental Assessment Method*

BRIDGE: *SustainaBle uRban planning Decision support accountINg for Urban mEtabolism*

CASBEE UD: *Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency for Urban Development*

CEN: Comité Europeo de Normalización

CGYM: Indicadores y Condicionantes para Ciudades Grandes y Medianas

DB HE: Documento Básico de Ahorro de Energía

CO₂: emisiones de dióxido de carbono

COP: *Conference of the Parts*

COP: *Coefficient Of Performance*

CPO: *Conditional Predictive Ordinate*

CTE: Código Técnico de la Edificación

D: Profundidad

DE_c: Demanda Energética de calefacción (kWh/m²año)

DE_r: Demanda Energética de refrigeración (kWh/m²año)

DGC: Dirección General del Catastro

DIC: *Deviance Information Criterion*

E: Este

ECC: *EarthCraft Communities*

EPBD: *Energy Performance of Buildings Directive*

FIS: *Forecasting Information Systems*

GEI: Gases de Efecto Invernadero

GLM: *Generalized Linear Models*

H: Altura

H/W: Proporción de calle (ratio altura-anchura)

HESU: Herramientas de Evaluación de la Sostenibilidad Urbana

HD_i: Horas de Discomfort en invierno (h/año)

HD_v: Horas de Discomfort en verano (h/año)

HQE2R: *Haute Qualité Environnementale et Economique Réhabilitation*

HVAC: *heating, ventilation, and air conditioning* (calefacción, ventilación y aire acondicionado)

INLA: *Integrated Nested Laplace Approximation*

IVACE: Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial

KITCASP: *Key Indicators for Territorial Cohesion and Spatial Planning*

L3R: Ley de rehabilitación, regeneración y renovación urbanas

LB: Libro Blanco de la Sostenibilidad en el Planeamiento Urbanístico Español

LEED ND: *Leadership in Energy and Environment Design for Neighborhood Development*

MCMC: *Markov Chain Monte Carlo*

MEE: Medidas de Eficiencia Energética

MV: Normas Técnicas del Sector de la Edificación

MU: Manzana Urbana

N: Norte

NBE: Norma Básica de la Edificación

NRE: *Norma Reglamentària d'Edificació*

NTE: Normas Tecnológicas de la Edificación

OECD: *Organisation for Economic Co-operation and Development*

O: Oeste

O: Orientación solar

PAU: Programas de Actuación Urbanística

PERI: Planes Especiales de Reforma Interior

PF: Plurifamiliar

PGOU: Plan General de Ordenación Urbana

PP: Planes Parciales

R: Resistencia térmica

RITE: Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios

RMSE: *Root Mean Square Error*

RUI: Regeneración Urbana Integrada

S: Sur

S: Superficie

SCR: *Sustainable Community Rating*

SEV: Plan Especial de Indicadores de Sostenibilidad Ambiental de la Actividad Urbanística de Sevilla

SIG: Sistemas de Información Geográfica

SMIS: Sistema Municipal de Indicadores de Sostenibilidad

SPEDE: *Stochastic Partial Differential Equation*

S/V: Factor de forma del edificio [m^{-1}]

U: Transmitancia térmica

UE: Unión Europea

UF: Unifamiliar

UN: *United Nations*

V: Volumen

W: Anchura

θ : Temperatura

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación.....	3
1.2 Objetivos y metodología	5
1.3 Estructura de la tesis.....	7
1.4 Referencias.....	9
2. ESTADO DEL ARTE.....	11
2.1 Introducción.....	13
2.2 Marco legislativo	14
2.2.1 Marco legislativo en el contexto europeo	15
2.2.2 Marco legislativo en el contexto nacional.....	17
2.3 Revisión de herramientas de evaluación de la sostenibilidad urbana (HESU)	20
2.4 Revisión de metodologías de evaluación energética del parque edificatorio.....	28
2.4.1 Dos enfoques: top-down y bottom-up.....	29
2.4.1.1 El enfoque top-down.....	29
2.4.1.2 El enfoque bottom-up	30
2.4.1.3 Comparativa entre el enfoque top-down y bottom-up	31
2.4.2 Metodologías existentes de evaluación energética del parque edificatorio	33
2.4.2.1 Revisión de metodologías a nivel internacional	33
2.4.2.2 Revisión de metodologías a nivel nacional	41
2.4.2.3 Síntesis de las metodologías revisadas	42
2.5 Evaluación energética de edificios	48
2.5.1 Definición de parámetros de cálculo	50
2.5.1.1 Solicitaciones exteriores.....	50
2.5.1.2 Solicitaciones interiores y condiciones operacionales.....	50
2.5.1.3 Definición morfológica y constructiva del edificio.....	52
2.5.1.4 Condiciones de soleamiento y sombras	54
2.5.1.5 Sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) y agua caliente sanitaria (ACS).....	55
2.5.2 Herramientas informáticas de simulación energética	56
2.6 Conclusión.....	60

2.7	Referencias.....	62
3.	SELECCIÓN DE VARIABLES PARA LA EVALUACIÓN ENERGÉTICA PASIVA.....	71
3.1	Introducción.....	73
3.2	Análisis de indicadores de sostenibilidad urbana propuestos por las HESU	74
3.2.1	Propuesta de estructura común de clasificación de indicadores	75
3.2.2	Análisis comparativo de indicadores contenidos en las HESU	92
3.2.3	Análisis del indicador energético en las HESU	101
3.3	Análisis de aspectos considerados en las metodologías de evaluación energética	109
3.4	Definición de variables respuesta y covariables.....	111
3.4.1	Definición de variables respuesta (indicadores energéticos).....	112
3.4.2	Definición de covariables	113
3.5	Conclusión.....	117
3.6	Referencias.....	118
4.	DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA	123
4.1	Introducción.....	125
4.2	Objetivo y requisitos de la metodología	126
4.2.1	Requisito A: adaptable al entorno	126
4.2.2	Requisito B: evaluación energética pasiva mediante los indicadores energéticos DE y HD	127
4.2.3	Requisito C: consideración del edificio y de la morfología urbana mediante covariables	127
4.2.4	Requisito D: simulación dinámica	127
4.2.5	Requisito E: modelización estadística	127
4.2.6	Requisito F: entorno SIG	129
4.3	Justificación de la necesidad de una nueva metodología	130
4.4	Estructura de la metodología.....	133
4.5	Etapa I: Caracterización de la taxonomía urbana.....	136
4.5.1	I.1 Escala de ciudad: identificación de patrones urbanos	137
4.5.2	I.2 Escala de barrio: identificación de tipos de barrios	137
4.5.3	I.3 Escala de manzana urbana: identificación de patrones de manzana.....	138
4.5.4	I.4 Escala de edificio: identificación de tipologías edificatorias	139
4.5.5	I.5 Configuración de la taxonomía urbana representativa.....	141
4.5.6	I.6 Selección de los edificios representativos.....	141

4.5.7	Creación de una base de datos en entorno SIG	142
4.6	Etapa II: Evaluación energética	143
4.6.1	II.1 Definición de las covariables	144
4.6.2	II.2 Planteamiento de las hipótesis de cálculo	144
4.6.3	II.3 Definición de los parámetros de cálculo para la obtención de las variables respuesta	145
4.7	Etapa III: Modelización estadística	145
4.7.1	III.1 Análisis descriptivo de los datos	145
4.7.2	III.2 Configuración de los modelos	146
4.7.3	III.3 Selección de modelos con mejor ajuste	147
4.7.4	III.4 Identificación de covariables significativas	148
4.8	Etapa IV: Extrapolación del diagnóstico energético a escala urbana	149
4.8.1	IV.1 Cálculo de los indicadores energéticos en cada edificio	150
4.8.2	IV.2 Desarrollo de una escala de valoración para los indicadores energéticos	150
4.8.3	IV.3 Desarrollo de mapas urbanos energéticos	151
4.9	Conclusión	151
4.10	Referencias	152
5.	IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN UN CASO DE APLICACIÓN	157
5.1	Introducción	159
5.2	Descripción del desarrollo urbanístico de Castellón de la Plana	160
5.2.1	La villa medieval amurallada de los siglos XIII y XIV	160
5.2.2	El surgimiento de los arrabales hasta el siglo XVIII	161
5.2.3	La ciudad industrial en el siglo XIX	162
5.2.4	El crecimiento a principios del siglo XX	163
5.2.5	La ciudad de la postguerra	164
5.2.6	La ciudad actual. Finales del siglo XX e inicios del XXI	166
5.3	Etapa I: Caracterización de la taxonomía urbana	167
5.3.1	I.1 Escala de ciudad	167
5.3.2	I.2 Escala de barrio	168
5.3.3	I.3 Escala de manzana urbana	171
5.3.4	I.4 Escala de edificio	174
5.3.4.1	Identificación de la clase de edificio	174
5.3.4.2	Delimitación de los periodos temporales	175

5.3.4.3	Obtención de la matriz de tipologías edificatorias	181
5.3.5	I.5 Configuración de la taxonomía urbana representativa	185
5.3.6	I.6 Selección de los edificios representativos	187
5.4	Etapa II: Evaluación energética	192
5.4.1	II.1 Definición de las covariables	192
5.4.1.1	Definición de las covariables a nivel urbano	192
5.4.1.2	Definición de las covariables a nivel de edificio	194
5.4.1.3	Resumen de covariables para evaluar el comportamiento energético del barrio	202
5.4.2	II.2 Planteamiento de las hipótesis de cálculo	202
5.4.3	II.3 Definición de los parámetros de cálculo para la obtención de las variables respuesta	204
5.5	Etapa III: Modelización estadística	206
5.5.1	III.1 Análisis descriptivo de los datos	206
5.5.2	III.2 Configuración de los modelos	207
5.5.3	III.3 Selección de modelos con mejor ajuste	210
5.5.4	III.4 Identificación de covariables significativas	213
5.6	Etapa IV: Extrapolación del diagnóstico energético a escala urbana	214
5.6.1	IV.1 Cálculo de los indicadores energéticos en cada edificio	215
5.6.2	IV.2 Desarrollo de una escala de valoración para los indicadores energéticos	216
5.6.3	IV.3 Desarrollo de mapas urbanos energéticos	217
5.7	Conclusión	220
5.8	Referencias	221
6.	ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS COVARIABLES EN EL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO PASIVO	223
6.1	Introducción	225
6.2	Análisis de la influencia de las covariables sobre los indicadores energéticos	226
6.2.1	Factor de forma (S/V)	227
6.2.2	Año de construcción (A)	229
6.2.3	Ratio altura-anchura de calle (H/W)	232
6.2.4	Manzana urbana (MU)	237
6.2.5	Orientación (O)	238
6.3	Propuesta de nueva configuración urbana y su evaluación energética	242
6.4	Relación de estrategias pasivas para mejorar el comportamiento energético del parque edificatorio residencial	253

6.5	Conclusión.....	255
6.6	Referencias.....	255
7.	CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS	257
7.1	Conclusiones	259
7.2	Futuros desarrollos	263
8.	PUBLICACIONES RELACIONADAS	265
	ANEXO I. LISTADO DE INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD URBANA.....	269
	ANEXO II. HIPÓTESIS DE CÁLCULO	303
	ANEXO III. ANÁLISIS DETALLADO DE LA DEMANDA DE REFRIGERACIÓN.....	311

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Principales características de las HESU analizadas	23
Tabla 2.2 Estructura de indicadores de las HESU analizadas.....	27
Tabla 2.3 Fortalezas y debilidades de los enfoques top-down y bottom-up.....	32
Tabla 2.4 Revisión de metodologías para la evaluación energética del parque edificado	43
Tabla 2.5 Clo según el nivel de vestimenta ISO 7730	51
Tabla 2.6 Características generales de los programas de simulación dinámica	57
Tabla 2.7 Comparación de las capacidades de los programas de simulación dinámica	58
Tabla 3.1 Estructura en dos niveles de categorías y subcategorías.....	76
Tabla 3.2 Análisis del nivel de relación entre las 14 categorías propuestas	79
Tabla 3.3 Clasificación de indicadores en la categoría “sitio y suelo”	81
Tabla 3.4 Clasificación de indicadores en la categoría “morfología urbana”	82
Tabla 3.5 Clasificación de indicadores en la categoría “movilidad y transporte”.....	83
Tabla 3.6 Clasificación de indicadores en la categoría “naturaleza y biodiversidad”	84
Tabla 3.7 Clasificación de indicadores en la categoría “edificación y vivienda”	85
Tabla 3.8 Clasificación de indicadores en la categoría “energía”	86
Tabla 3.9 Clasificación de indicadores en la categoría “agua”	87
Tabla 3.10 Clasificación de indicadores en la categoría “materiales”	87
Tabla 3.11 Clasificación de indicadores en la categoría “residuos”	88
Tabla 3.12 Clasificación de indicadores en la categoría “contaminación”	88
Tabla 3.13 Clasificación de indicadores en la categoría “aspecto social”	89
Tabla 3.14 Clasificación de indicadores en la categoría “aspecto económico”	90
Tabla 3.15 Clasificación de indicadores en la categoría “gestión e institución”	91
Tabla 3.16 Clasificación de indicadores en la categoría “innovación”	91
Tabla 3.17 Comparación de la distribución del porcentaje de pesos en las herramientas LEED ND, CASBEE UD y BREEAM Communities	101
Tabla 3.18 Clasificación de las subcategorías del aspecto “energía”	102
Tabla 3.19 Indicadores relacionados con el aspecto “energía” que tienen en cuenta el comportamiento pasivo en la edificación y el urbanismo	103
Tabla 3.20 Aspectos relevantes para evaluar el comportamiento pasivo derivados de los indicadores energéticos de las HESU	108
Tabla 3.21 Aspectos considerados en los modelos bottom-up analizados	110
Tabla 4.1 Alcance de los modelos bottom-up analizados	131

Tabla 4.2 Paquete de valores de transmitancias térmicas (U) para cada periodo temporal constructivo.....	140
Tabla 4.3 Ejemplo de información de entrada (tabla de atributos) para la creación de la base de datos SIG proporcionada por la DGC.....	143
Tabla 4.4 Codificación de tipologías edificatorias según Dirección General del Catastro español....	143
Tabla 4.5 Primera batería de modelos considerando las covariables H/W, A, O y S/V por separado, comparando las MU	146
Tabla 4.6 Segunda batería de modelos considerando las covariables H/W, A, O y S/V de forma conjunta, comparando las MU	147
Tabla 4.7 Tercera batería de modelos considerando todas las covariables (H/W, A, O, S/V y MU) por separado.....	147
Tabla 4.8 Cuarta batería de modelos considerando todas las covariables (H/W, A, O, S/V y MU) de forma conjunta.....	147
Tabla 4.9 Formato de la tabla de atributos de SIG	150
Tabla 4.10 Escala de valoración para los indicadores DE_r , y DE_c	151
Tabla 4.11 Escala de valoración para los indicadores DE_r , y DE_c	151
Tabla 5.1 Síntesis de Planes Urbanísticos de Castellón de la Plana	167
Tabla 5.2 Delimitación de barrios en Castellón de la Plana según zonas residenciales del PGOU	169
Tabla 5.3 Tipologías y características de las manzanas urbanas identificadas en la ciudad.....	172
Tabla 5.4 Obtención de clases de edificio	174
Tabla 5.5 Identificación de clases de edificios.....	175
Tabla 5.6 Evolución temporal de los sistemas constructivos en edificios residenciales	179
Tabla 5.7 Matriz de tipologías edificatorias en la ciudad	184
Tabla 5.8 Análisis de la superficie construida por tipología edificatoria en el barrio para selección de los edificios muestra representativos.....	188
Tabla 5.9 Número de edificios, superficie construida (m^2) y % de superficie construida por clase de edificio y por tipología de manzana.....	191
Tabla 5.10 Características de las manzanas urbanas residenciales.....	193
Tabla 5.11 Características dimensionales de los edificios muestra $PF_{M(>4)}$, $PF_{M(\leq 4)}$ y $UF_{M(\leq 4)}$	194
Tabla 5.12 Transmitancias térmicas de las soluciones constructivas contempladas en los cinco periodos temporales	199
Tabla 5.13 Transmitancias térmicas de los puentes térmicos en los cinco periodos temporales	202
Tabla 5.14 Definición de covariables.....	202
Tabla 5.15 Parámetros de cálculo considerados en DesignBuilder	205
Tabla 5.16 Descripción de las variables respuesta DE_r , DE_c , HD_v y HD_i	206
Tabla 5.17 DIC para la primera batería de 32 modelos considerando las covariables H/W, A, O y S/V por separado, comparando MU_1 y MU_2	208

Tabla 5.18 DIC para la segunda batería de 8 modelos considerando las covariables H/W, A, O y S/V de forma conjunta, comparando MU ₁ y MU ₂	208
Tabla 5.19 DIC para la tercera batería de 24 modelos considerando todas las covariables (H/W, A, O, S/V y MU) por separado	208
Tabla 5.20 DIC para la cuarta batería de 4 modelos considerando todas las covariables (H/W, A, O, S/V y MU) de forma conjunta	209
Tabla 5.21 CPO para la primera batería de 32 modelos considerando las covariables H/W, A, O y S/V por separado, comparando MU ₁ y MU ₂	209
Tabla 5.22 CPO para la segunda batería de 8 modelos considerando las covariables H/W, A, O y S/V de forma conjunta, comparando MU ₁ y MU ₂	209
Tabla 5.23 CPO para la tercera batería de 24 modelos considerando todas las covariables (H/W, A, O, S/V y MU) por separado	209
Tabla 5.24 CPO para la cuarta batería de 4 modelos considerando todas las covariables (H/W, A, O, S/V y MU) de forma conjunta	209
Tabla 5.25 Correlación y RMSE para la primera batería de 32 modelos	210
Tabla 5.26 Correlación y RMSE para la segunda batería de 8 modelos	210
Tabla 5.27 Correlación y RMSE para la tercera batería de 20 modelos	211
Tabla 5.28 Correlación y RMSE para la cuarta batería de 4 modelos	211
Tabla 5.29 Efectos fijos: β_i (media [percentil 2,5; percentil 97,5]). Primer conjunto de 32 modelos	213
Tabla 5.30 Efectos fijos: β_i (media [percentil 2,5; percentil 97,5]). Segundo conjunto de 8 modelos	213
Tabla 5.31 Efectos fijos: β_i (media [percentil 2,5; percentil 97,5]). Tercer conjunto de 20 modelos	213
Tabla 5.32 Efectos fijos: β_i (media [percentil 2,5; percentil 97,5]). Cuarto conjunto de 4 modelos	213
Tabla 5.33 Cálculo de los cuatro indicadores energéticos para cada edificio	215
Tabla 5.34 Escala de valoración para el indicador energético DE basado en la clasificación propuesta por la legislación española para edificios existentes (kWh/m ² año)	216
Tabla 5.35 Escala de valoración para el indicador energético HD (horas/año)	216
Tabla 6.1 Comparativa de DE y HD de una misma vivienda orientada a N, E, S y O	241
Tabla 6.2 Estudio de dos diseños de manzana urbana	244
Tabla 6.3 Análisis del soleamiento en las fachadas S, E y O de la manzana en el solsticio de invierno	246
Tabla 6.4 Características dimensionales del edificio tomado como referencia	247
Tabla 6.5 Determinación de indicadores para las diferentes orientaciones de la manzana	249
Tabla 6.6 Cálculo de los indicadores energéticos en la planificación urbana propuesta	252

Tabla 6.7 Comparativa entre configuración existente y propuesta para una superficie de referencia de 17,6 Ha.....	253
Tabla 6.8 Estrategias pasivas para mejorar el comportamiento energético del parque edificatorio residencial	254
Tabla 8.1 Publicaciones relacionadas con la tesis	267
Tabla AI.1 Lista de indicadores en la herramienta LEED ND.....	271
Tabla AI.2 Lista de indicadores en la herramienta BREEAM Communities	273
Tabla AI.3 . Lista de indicadores en la herramienta CASBEE UD	275
Tabla AI.4 Lista de indicadores en la herramienta ECOCITY	278
Tabla AI.5 Lista de indicadores en la herramienta Le modele INDI-RU 2005	288
Tabla AI.6 Lista de indicadores en la herramienta BIRDGE	291
Tabla AI.7 Lista de indicadores en la herramienta KITCASP	292
Tabla AI.8 Lista de indicadores en la herramienta LB.....	293
Tabla AI.9 Lista de indicadores en la herramienta SMIS	296
Tabla AI.10 Lista de indicadores en la herramienta CGYM	298
Tabla AI.11 . Lista de indicadores en la herramienta SEV	300
Tabla AI.12 . Lista de indicadores en la herramienta BCN.....	301
Tabla AI.13 . Lista de indicadores en la herramienta BIL.....	302
Tabla AII.1 Lista de indicadores en la herramienta LEED ND	305
Tabla AIII.1 Cálculo de la inercia térmica de la fachada considerada en el periodo temporal 1 (anterior a 1940)	316
Tabla AIII.2 Comparativa de demandas energéticas entre H82 y edificio aislado.....	319

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Temas abordados en la tesis	5
Figura 1.2 Metodología de trabajo.....	7
Figura 1.3 Estructura de la tesis y relación entre capítulos, objetivos y resultados esperables	8
Figura 2.1 Áreas relacionadas con la tesis	13
Figura 2.2 Evolución de las directivas europeas relacionadas con la eficiencia energética	17
Figura 2.3 Evolución de viviendas construidas a lo largo del siglo XX e inicios del XXI y relación con la legislación española (elaboración propia a partir de datos del Instituto Nacional de Estadística	19
Figura 2.4 Enfoques de modelización top-down y bottom-up	32
Figura 2.5 Balance de energía en un edificio.....	49
Figura 2.6 Cerramientos de la envolvente térmica del edificio	53
Figura 2.7 Reflexión solar de las superficies del edificio sobre el mismo u otro edificio.....	54
Figura 2.8 Reflectancia solar en el edificio producida por obstrucciones. Reflexión difusa de la radiación directa sobre la superficie de un voladizo (a), reflexión difusa de la radiación solar del cielo en un voladizo (b), reflexión directa especular desde la superficie de la fachada de un edificio adyacente constituida por vidrio (c).....	54
Figura 2.9 Reflexión difusa sobre el terreno	55
Figura 2.10 Posición de los dispositivos de protección solar con respecto al hueco.....	55
Figura 3.1 Esquema del Capítulo 3	74
Figura 3.2 Metodología aplicada para proponer una estructura de indicadores	74
Figura 3.3 Número de indicadores que cada HESU analizada confiere a las 14 categorías propuestas en este trabajo	92
Figura 3.4 Número de indicadores de las 13 HESU analizadas contenidos en las 14 categorías	93
Figura 3.5 Distribución estadística del número de indicadores en las 14 categorías propuestas	97
Figura 3.6 Distribución del porcentaje de pesos en las 14 categorías propuestas por las herramientas LEED ND, CASBEE UD y BREEAM Communities	100
Figura 3.7 Covariables y variables respuesta seleccionadas.....	112
Figura 3.8 Covariables consideradas para analizar el comportamiento energético de los edificios a escala urbana (O: orientación; H/W: proporción de calle; A: año de construcción; S/V: factor de forma; MU: configuración urbana).....	113
Figura 3.9 Manzanas en trazado radial (izquierda) y manzanas en trazado ortogonal (derecha) (Fuente: elaboración propia a partir de Google Maps)	114
Figura 3.10 Obstrucción solar provocada por el ratio H/W de una calle en una latitud de 40°N.....	115
Figura 3.11 Definición de la orientación solar de la fachada principal en CTE (izquierda) y en el marco de la tesis (derecha)	116

Figura 4.1 Estructura del Capítulo 4	125
Figura 4.2 Requisitos de la metodología	126
Figura 4.3 Etapas de la metodología propuesta	134
Figura 4.4 Procedimiento para la caracterización de la taxonomía urbana	136
Figura 4.5 Ejemplos de ciudades con trazados urbanos característicos de la ciudad española	137
Figura 4.6 Metodología para la caracterización de la tipología edificatoria.....	140
Figura 4.7 Procedimiento de asociación de tipologías edificatorias a tipologías de manzana urbana	141
Figura 4.8 Información necesaria para cada parcela catastral	142
Figura 4.9 Procedimiento a seguir para el planteamiento de las hipótesis objeto de simulación energética.....	144
Figura 4.10 Enfoque metodológico para la modelización estadística	145
Figura 4.11 Procedimiento de agregación.....	149
Figura 5.1 Ubicación de Castellón de la Plana	159
Figura 5.2 Castellón de la Plana en los siglos XIII y XIV según Vicente Traver Tomás.....	160
Figura 5.3 Castellón de la Plana en el siglo XVI según Gimeno Michavila. Arrabal de Roser y San Francisco al sur y el de les Forques al norte	161
Figura 5.4 Murallas Carlistas en Castellón de la Plana en la segunda mitad del siglo XIX	162
Figura 5.5 Forma circular de Castellón de la Plana en la década de los 50	165
Figura 5.6 Desarrollo urbano de Castellón de la Plana	166
Figura 5.7 Identificación de patrones urbanos en la ciudad.....	168
Figura 5.8 Identificación de barrios y superposición a la evolución urbana de la ciudad.....	171
Figura 5.9 Períodos temporales de construcción propuestos	181
Figura 5.10 Obtención de las 30 tipologías edificatorias en la ciudad.....	181
Figura 5.11 Procedimiento a seguir para la obtención de las clases de edificios en un SIG	182
Figura 5.12 Visualización de las clases de edificios en el entorno SIG.....	183
Figura 5.13 Visualización de los años de construcción de los edificios en el entorno SIG.....	183
Figura 5.14 Ejemplo de la tabla de atributos en gvSIG	184
Figura 5.15 Evolución en la construcción de edificios en Castellón de la Plana	185
Figura 5.16 Taxonomía urbana de la ciudad de Castellón de la Plana.....	186
Figura 5.17 Ubicación del barrio Parque del Oeste en el contexto de la ciudad	187
Figura 5.18 Edificios muestra representativos y superficie construida	189
Figura 5.19 Visualización en entorno SIG de las clases de edificios y tipologías de manzanas contenidas en el barrio	190

Figura 5.20 Configuración de las manzanas MU ₁ y MU ₂ en el barrio.	191
Figura 5.21 Orientación de las fachadas de los edificios en el barrio.....	193
Figura 5.22 Planta baja (inferior) y planta tipo (superior) del edificio PF _{M(>4)}	195
Figura 5.23 Planta baja (inferior) y planta tipo (superior) del edificio PF _{M(≤4)}	196
Figura 5.24 Planta baja, primera, segunda y bajo cubierta (de abajo a arriba) del edificio UF _{M(≤4)}	197
Figura 5.25 Configuración de las 240 hipótesis para determinar las cuatro variables respuesta.....	202
Figura 5.26 Ejemplo de configuración de la H81, H82, H83 y H84 en DesignBuilder	203
Figura 5.27 Ejemplo de configuración de la H229, H230, H231 y H232 en DesignBuilder	204
Figura 5.28 Histograma (izquierda) y diagrama de cajas y bigotes (derecha) de las variables respuesta	207
Figura 5.29 Histograma (arriba) y diagrama de cajas y bigotes (abajo) de las variables respuesta para MU ₁ (izquierda) y MU ₂ (derecha)	207
Figura 5.30 Coeficiente de correlación ente los valores observados y los predichos de los modelos seleccionados	212
Figura 5.31 Mapa energético urbano para el indicador DE _r	217
Figura 5.32 Mapa energético urbano para el indicador DE _c	218
Figura 5.33 Mapa energético urbano para el indicador HD _v	219
Figura 5.34 Mapa energético urbano para el indicador HD _i	219
Figura 6.1 Estructura del Capítulo 6	226
Figura 6.2 Resultados de las variables respuesta (DE _r , DE _c , HD _v , HD _i) en los tres factores de forma (S/V), para la MU ₁ y MU ₂	228
Figura 6.3 Resultados de las variables respuesta (DE _r , DE _c , HD _v , HD _i) en los cinco periodos temporales, para la MU ₁ y MU ₂	229
Figura 6.4 Evolución temporal de la transmitancia térmica (kWh/m2año) de los elementos de envolvente térmica.....	230
Figura 6.5 Resultados de las variables respuesta (DE _r , DE _c , HD _v , HD _i) en las dos ratios H/W, para la MU ₁ y MU ₂	233
Figura 6.6 Datos sobre radiación solar propia del sitio y resultados de ganancias internas y solares en las H82 y H102	234
Figura 6.7 Parámetros para el cálculo de H/W (Granados, 2006)	235
Figura 6.8 Carta solar estereográfica para la latitud 39,98º (Matusiak, 2016).....	236
Figura 6.9 Resultados de las variables respuesta (DE _r , DE _c , HD _v , HD _i) en MU ₁ y MU ₂	237
Figura 6.10 Proporción de la manzana	238
Figura 6.11 Resultados de las variables respuesta (DE _r , DE _c , HD _v , HD _i) en las cuatro orientaciones, para la MU ₁ y MU ₂	239
Figura 6.12 Vivienda tipo B de la planta 6 en el edificio PF _{M(>4)}	240

Figura 6.13 Procedimiento para definir la configuración urbana	243
Figura 6.14 Configuración geométrica de la nueva manzana.....	245
Figura 6.15 Gráfico de relación entre la demanda energética y la orientación. Orientación óptima	250
Figura 6.16 Soleamiento en la orientación de manzana óptima (solsticio invierno).....	251
Figura 6.17 Configuración urbana existente (izquierda) y propuesta (derecha)	251
Figura 6.18 Configuración de las edificaciones en la manzana urbana propuesta	252
Figura AIII.1 Resultados de confort térmico para la H82	314
Figura AIII.2 Resultados del balance térmico en la H82	315
Figura AIII.3 Resultados horarios de confort en el día de máxima θ_{bs} para la H82	317
Figura AIII.4 Resultados de demandas energéticas mensuales para la H82.....	318
Figura AIII.5 Resultados de demandas energéticas mensuales para la H82, suponiendo el edificio aislado	318

1. INTRODUCCIÓN

Propuesta **metodológica** para la caracterización del **comportamiento energético pasivo** del parque edificatorio **residencial** existente considerando su contexto **urbano**.

1.1 JUSTIFICACIÓN

Según el informe *World Urbanization Prospects* (United Nations, 2014), en la actualidad el 54% de la población mundial vive en áreas urbanas y, en la Unión Europea (UE), este porcentaje asciende al 73%, donde además se espera que alcance el 80% en el año 2050. Frente a este escenario, la comunidad científica pone sus miras en las áreas urbanas, pues estas son grandes consumidoras de recursos y, por tanto, responsables de una parte vital del impacto global causado al medioambiente. Sin embargo, por este mismo motivo, las áreas urbanas también ofrecen un amplio campo sobre el que actuar para establecer políticas encaminadas a fomentar su sostenibilidad.

El término Desarrollo Sostenible emerge en 1987 a partir del informe Brundtland (1987) y comienza a abordarse así el concepto de sostenibilidad. A partir de entonces se han realizado numerosos esfuerzos por medir el nivel de sostenibilidad de diferentes sistemas a través del uso de indicadores. En el ámbito de la edificación, dichos esfuerzos se dirigieron, en un principio, a desarrollar herramientas de evaluación focalizadas en los edificios a nivel individual, pero dos décadas más tarde, algunas de dichas herramientas ya han evolucionado para dar respuesta a las exigencias que supone afrontar la sostenibilidad desde una perspectiva más amplia y global, la urbana. Las dimensiones clásicas de la sostenibilidad, la ambiental, la social y la económica, constituyen sus tres pilares fundamentales y también están presentes cuando hablamos de sostenibilidad urbana. Sin alguno de ellos sería inviable diseñar entornos urbanos que generen un bajo impacto sobre el medio ambiente, que den respuesta a las necesidades de su población y que desarrollen los mecanismos económicos adecuados para construirlos de manera asequible.

En el sector de la edificación, la dimensión ambiental presenta una estrecha relación con el aspecto energético y el entorno construido, ya que los edificios son responsables del 40% del consumo total de energía en la UE (Comisión Europea, 2010). Es por ello que la reducción del consumo energético en el sector de la edificación constituye un importante reto para minimizar la dependencia energética, del 72,9% en el caso español (Eurostat, 2014), y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Dentro de este sector, los edificios de uso residencial son clave tanto en el contexto actual nacional como en el europeo debido a la importancia que adquiere su demanda energética, la cual, en términos de consumo total y de consumo eléctrico asciende respectivamente a un 17% y 25% a nivel nacional, y a un 25% y 29% a nivel de la UE (IDAE, 2011). Si bien es cierto que este sector en términos comparativos respecto a otros sectores presenta actualmente menor consumo, en términos relativos es uno de los sectores, junto al de servicios, que en los últimos años ha experimentado un mayor crecimiento. Asimismo, son diversos los factores que hacen prever una tendencia futura al alza, entre ellos, el incremento del número de hogares, los hábitos de consumo de sus ocupantes o el aumento en el equipamiento, propiciado por un mayor poder adquisitivo y una mejora en el nivel de vida.

Por otro lado, como consecuencia del aumento en el precio de la energía, los hogares de la UE gastaron de media un 6,4% de sus ingresos para hacer frente a las facturas energéticas, pero también como consecuencia de la crisis financiera en la que esta se ve inmersa, el 11% de los hogares no fueron capaces de mantener unas condiciones adecuadas de confort térmico (European Commission, 2014), cayendo así en riesgo de pobreza energética. Ello constituye una creciente preocupación que merece especial atención y hace necesario el estudio de mecanismos que mejoren la eficiencia energética del parque edificado. Por estos motivos, el sector de la edificación

residencial ocupa una posición preferente en las políticas y estrategias energéticas y medioambientales, tanto presentes como futuras.

A pesar de la introducción de nuevos requerimientos sobre eficiencia energética en la legislación en materia de edificación, los edificios de nueva planta solo consumen la mitad que aquellos que fueron construidos en la década de los 80 (European Commission, 2014). El bajo rendimiento de sus instalaciones térmicas, la inexistencia de aislamiento térmico en la envolvente o la todavía abundante presencia de vidrios simples en las ventanas, son solo algunos ejemplos de los motivos que llevan a esta situación. Por ello, se prevé que sean introducidos progresivamente en la legislación nuevos estándares en los próximos años. En los futuros edificios que están por construir, por tanto, se implementarán nuevas limitaciones que aseguren la reducción de su consumo energético, pero no hay que olvidar que es en los edificios existentes donde reside el mayor potencial de ahorro, pues el volumen edificado que no atiende a ningún criterio de eficiencia energética (del 58% en el caso español), es superior al volumen a construir. Por ello, actualmente la legislación también fija su mirada en la intervención en la ciudad consolidada y su parque edificatorio residencial existente.

Estos hechos constatan la obsolescencia de la ciudad y de su parque de vivienda, abriendo paso a la necesidad de intervenir sobre el tejido residencial ya consolidado. En 2010, la Declaración de Toledo (Presidencia Española, 2010) ve la luz precisamente con el objetivo de afrontar los retos urbanos actuales y garantizar la consecución de un desarrollo urbano más inteligente, sostenible y socialmente inclusivo, otorgando importancia a la Regeneración Urbana Integrada (RUI) como instrumento estratégico para alcanzar dicho objetivo (Presidencia Española, 2010). Tres años más tarde, entra en vigor en España la Ley 8/2013 (L3R), que trata de potenciar la rehabilitación edificatoria y la regeneración y renovación urbanas, eliminando trabas actualmente existentes y creando mecanismos específicos que la hagan viable y posible. Es de destacar que esta concede la iniciativa de las acciones a los propietarios y, muy especialmente, a las administraciones públicas, quienes deberán adoptar medidas que aseguren la realización de obras de conservación, actuaciones de rehabilitación edificatoria y el desarrollo de instrumentos para combatir, entre otros aspectos, la vulnerabilidad de barrios y las situaciones de pobreza energética (Gobierno de España, 2013). Además, establece como una de las actuaciones prioritarias aquellas dirigidas a fomentar un uso racional de la energía. Así, la administración cobra un papel relevante que será clave para asegurar la conservación y constante renovación de la ciudad, lo que hace cobrar fuerza a la dimensión institucional como aspecto a integrar en los pilares de la sostenibilidad.

Ante este panorama, no cabe duda que es necesario el desarrollo de instrumentos y estrategias que permitan hacer frente a estos objetivos. No obstante, la adopción de estrategias debe ser conducida con objetividad y transparencia y, para ello, resulta necesario evaluar previamente el escenario actual. Por ello, las herramientas de diagnóstico adquieren relevancia en este sentido y constituyen el primer paso para el desarrollo de acciones encaminadas a la mejora de la ciudad consolidada, desde la perspectiva de la sostenibilidad.

Esta tesis propone una metodología que puede ser utilizada como herramienta de diagnóstico para la identificación de barrios energéticamente vulnerables y para proporcionar asistencia en los procesos de toma de decisión durante las intervenciones de rehabilitación urbana, en las que se ven involucradas las administraciones locales y otros agentes del sector, como arquitectos, arquitectos técnicos, ingenieros y urbanistas.

Con todo ello, la tesis aborda tres aspectos fundamentales recogidos en la Figura 1.1, que son, el parque edificatorio residencial existente, su eficiencia energética y cómo esta puede contribuir a alcanzar la sostenibilidad urbana. En este contexto, se va a profundizar en las siguientes temáticas:

- Legislación relativa a eficiencia energética en los edificios

- Herramientas de evaluación de la sostenibilidad urbana
- Metodologías de evaluación de la eficiencia energética del parque edificatorio
- Evaluación energética de edificios

Estas cuatro temáticas serán estudiadas en el Capítulo 2.

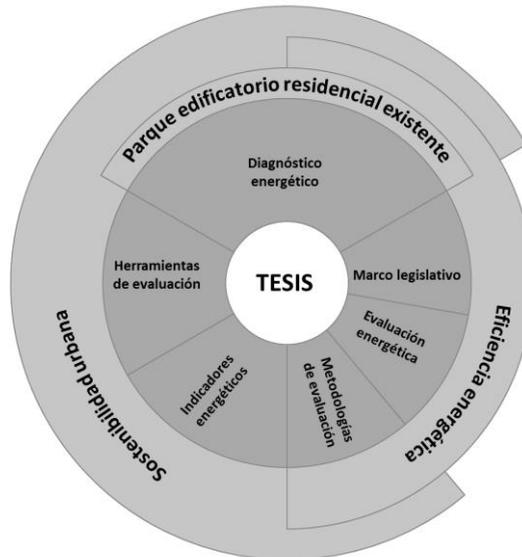


Figura 1.1 Temas abordados en la tesis

1.2 OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

El objetivo principal de esta tesis es desarrollar una metodología para caracterizar el comportamiento energético pasivo del parque edificatorio residencial existente considerando su contexto urbano, que permita realizar un diagnóstico energético de áreas urbanas consolidadas.

Para alcanzar este objetivo principal, se plantean seis objetivos específicos:

- Objetivo 1: Conocer el estado del arte sobre cada una de las temáticas que se abordan en la tesis.
- Objetivo 2: Identificar un conjunto de variables que permitan evaluar el comportamiento energético pasivo del parque edificatorio residencial existente.
- Objetivo 3: Proponer un procedimiento para caracterizar el parque residencial de edificios de un entorno urbano consolidado e identificar la taxonomía urbana representativa.
- Objetivo 4: Desarrollar un modelo de predicción, basado en los métodos experimental y estadístico, que permita estimar, a escala urbana, el comportamiento energético pasivo de los edificios, a través de los indicadores y covariables previamente identificados.

- Objetivo 5: Proponer un procedimiento que permita representar los resultados de implementar la metodología en mapas urbanos energéticos.
- Objetivo 6: Implementar la metodología propuesta en un caso de aplicación.

Para alcanzar dichos objetivos, es necesario llevar a cabo las siguientes tareas que se mencionan a continuación:

Objetivo 1: Conocer el estado del arte sobre cada una de las temáticas que se abordan en la tesis.

- 1.1: Revisión de las herramientas y sistemas de indicadores de evaluación de la sostenibilidad urbana presentes en la literatura.
- 1.2: Revisión de las metodologías de evaluación energética de edificios presentes en la literatura.
- 1.3: Estudio de la legislación que ampara el panorama actual sobre eficiencia energética en edificios.
- 1.4: Revisión de los fundamentos de la simulación energética de edificios y las herramientas existentes en el mercado.

Objetivo 2: Identificar un conjunto de variables que permitan evaluar el comportamiento energético pasivo del parque edificatorio residencial existente.

- 2.1: Identificación de un conjunto de indicadores energéticos de evaluación del comportamiento energético pasivo del parque edificatorio residencial existente.
- 2.2: Identificación de un conjunto de covariables, urbanas y edificatorias, susceptibles de influir en el comportamiento pasivo del parque edificatorio residencial existente.

Objetivo 3: Proponer un procedimiento para caracterizar el parque residencial de edificios de un entorno urbano consolidado e identificar la taxonomía urbana representativa.

- 3.1: Desarrollo de un procedimiento para identificar la taxonomía urbana representativa.
- 3.2: Desarrollo de un procedimiento para obtener una base de datos de información urbana georreferenciada.

Objetivo 4: Desarrollar un modelo de predicción, basado en los métodos experimental y estadístico, que permita estimar, a escala urbana, el comportamiento energético pasivo de los edificios, a través de los indicadores y covariables previamente identificados.

- 4.1: Desarrollo de un procedimiento para la evaluación energética pasiva, mediante la simulación de unas hipótesis de cálculo que representen a la taxonomía urbana de una determinada área urbana objeto de estudio.

- 4.2: Desarrollar un conjunto de ecuaciones matemáticas de predicción, obtenidas mediante el análisis estadístico de los resultados experimentales, para estimar los indicadores energéticos de un área urbana objeto de estudio.

Objetivo 5: Proponer un procedimiento que permita representar los resultados de implementar la metodología en mapas urbanos energéticos.

- 5.1: Propuesta de un procedimiento para generar mapas urbanos energéticos.

Objetivo 6: Implementar la metodología propuesta en un caso de aplicación.

- 6.1: Definición de la taxonomía urbana de la ciudad objeto de estudio.
- 6.2: Obtención del diagnóstico energético del barrio objeto de estudio y representación gráfica de los resultados en mapas urbanos energéticos, los cuales permiten priorizar las futuras intervenciones de rehabilitación en aquellas áreas con necesidades preferentes.
- 6.3: Propuesta de recomendaciones a implementar en nuevos tejidos urbanos y existentes, a partir del análisis de los resultados obtenidos del caso de aplicación.

1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La tesis consta de siete capítulos. El primero de ellos, correspondiente al presente Capítulo 1, contextualiza el trabajo, presenta los objetivos del mismo y expone la metodología aplicada para llevarlo a cabo. Los Capítulos 2, 3, 4, 5 y 6 constituyen el grueso del trabajo y cada uno de ellos tiene el cometido de desarrollar uno o varios de los objetivos específicos que se establecen en el apartado 1.2. Finalmente, el Capítulo 7 recoge las conclusiones de la tesis y los futuros desarrollos.

Los diferentes capítulos de la tesis desarrollan cronológicamente el procedimiento de trabajo seguido, el cual se muestra en la Figura 1.2 y se describe a continuación.

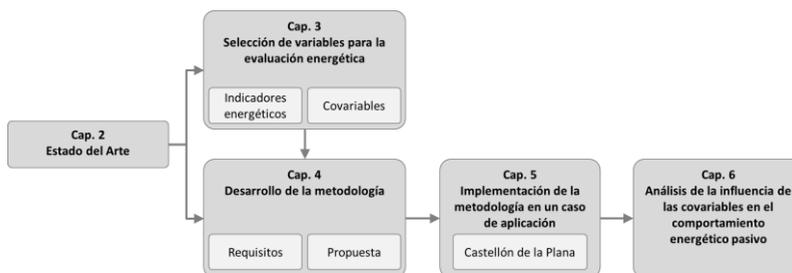


Figura 1.2 Metodología de trabajo

- Capítulo 2. Revisión del estado del arte relativo a las herramientas de evaluación de la sostenibilidad urbana, las metodologías de evaluación energética, la legislación relativa a la eficiencia energética en los edificios y los fundamentos sobre evaluación energética de edificios, con la finalidad de conocer los trabajos y la literatura desarrollados hasta la fecha.
- Capítulo 3. Identificación de variables que permitan evaluar con objetividad y transparencia el comportamiento energético pasivo del parque edificatorio residencial existente, teniendo en cuenta tanto condicionantes del edificio como urbanos, que puedan tener una influencia sobre dicho comportamiento. Para ello, se profundiza en la revisión de aspectos e indicadores considerados por las herramientas de evaluación de la sostenibilidad y las metodologías de evaluación energética, lo que tiene como resultado la definición de un conjunto de indicadores energéticos y un conjunto de covariables, que ambos serán integrados en la metodología.
- Capítulo 4. Desarrollo de la metodología para la caracterización del comportamiento energético pasivo del parque edificatorio residencial existente. En primer lugar, se establecen los requisitos que debe reunir la metodología y, a continuación, se desarrollan las diferentes etapas que la constituyen.
- Capítulo 5. Implementación de la metodología en un caso de estudio. Se selecciona el municipio de Castellón de la Plana para aplicar las diferentes etapas de la metodología, que tiene como resultado el diagnóstico energético de uno de sus barrios.
- Capítulo 6. Análisis de la influencia de las covariables en el comportamiento energético pasivo. Los resultados de la evaluación energética del parque edificatorio residencial del barrio objeto de estudio en el Capítulo 5, son analizados críticamente con el objetivo de proponer un conjunto de estrategias a tener en cuenta a la hora de rehabilitar el tejido urbano del barrio y en el supuesto de planificar nuevos desarrollos urbanos. En este capítulo, además, se propone una nueva configuración urbana teniendo en cuenta dichas estrategias, de manera que es posible validar el ahorro energético que supondría planificar nuevos desarrollos urbanísticos con la nueva configuración urbana.

De forma sintética, la Figura 1.3 relaciona cada uno de estos capítulos con el objetivo u objetivos que aborda y las tareas necesarias para su consecución.

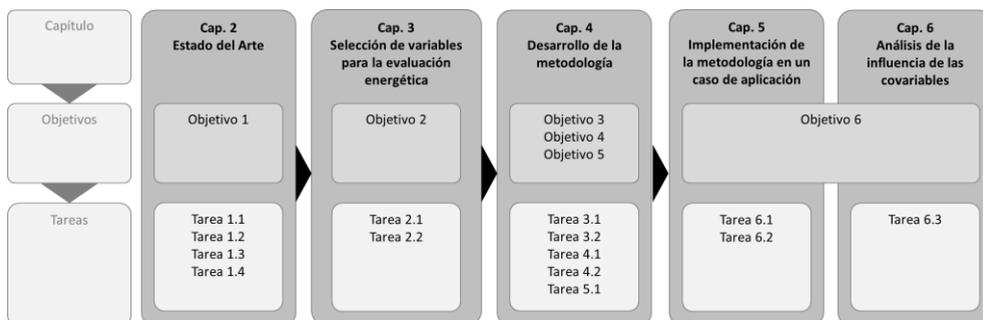


Figura 1.3 Estructura de la tesis y relación entre capítulos, objetivos y resultados esperables

1.4 REFERENCIAS

Brundtland, G.H., 1987. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. Oslo.

Comisión Europea, 2010. Directiva 2010/31/UE del parlamento Europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios. Comunidad Europea.

European Commission, 2014. Communication from the Commission to the European Parliament and the Council. Energy Efficiency and its contribution to energy security and the 2030 Framework for climate and energy policy. Brussels.

Eurostat, 2014. Energy dependence [WWW Document]. URL <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&pcode=tsdcc310&plugin=1> (accedido 2.21.16).

Gobierno de España, 2013. Ley 8/2013, de 26 de junio, de rehabilitación, regeneración y renovación urbanas. España.

IDAE, 2011. PROYECTO SECH-SPAHOUSEC. Análisis del consumo energético del sector residencial en España. Informe final. Ministerio de Industria, Energía y Turismo.

Presidencia Española, 2010. Declaración de Toledo, Reunión informal de Ministros. España.

United Nations, 2014. World Urbanization Prospects: the 2014 Revision. New York.



2. ESTADO DEL ARTE

Propuesta **metodológica** para la caracterización del **comportamiento energético pasivo** del parque edificatorio **residencial** existente considerando su contexto **urbano**.

2.1 INTRODUCCIÓN

Como se desprende del Capítulo 1, el parque edificatorio residencial existente juega un papel estratégico en el camino hacia la sostenibilidad. El enfoque urbano que esta adquiere, hace que aspectos de muy diversa índole deban ser integrados, lo que genera un problema complejo de desmenuzar y de poner en práctica para alcanzar unos niveles adecuados de sostenibilidad. En particular, lidiar con el aspecto energético supone un importante reto para cumplir con los objetivos de reducción de emisiones de GEI y de consumo energético, y luchar así contra el cambio climático y la dependencia energética de los países, respectivamente.

El presente capítulo aborda una revisión del estado del arte de cada una de las cuatro temáticas relacionadas con la tesis, expuestas en el capítulo anterior: marco legislativo relativo a la eficiencia energética de los edificios, herramientas de evaluación de la sostenibilidad urbana, metodologías de evaluación energética del parque edificatorio y evaluación energética de edificios.

En primer lugar, se analiza el marco legislativo relativo a la eficiencia energética en los edificios con el objeto de conocer las normativas que, impuestas desde la Unión Europea, condicionan los requerimientos del parque edificatorio y su desarrollo.

En segundo lugar, se realiza una revisión de las principales herramientas de evaluación de la sostenibilidad urbana que existen en la literatura. Con ello, se analiza el diferente enfoque de cada una de ellas y cómo estructuran los indicadores de evaluación, lo que servirán como uno de los puntos de partida del Capítulo 3 para seleccionar los indicadores a integrar en la propuesta metodológica.

A continuación, se revisan las metodologías de evaluación energética del parque edificatorio, tanto a nivel internacional como nacional, y se comparan los dos enfoques principales que estas adoptan, *bottom-up* y *top-down* (Moffatt, 2001). Se analiza un amplio número de trabajos existentes en la literatura para comparar las características generales que cada uno de los modelos incorpora. Esta revisión también sirve como punto de partida del Capítulo 3, donde se lleva a cabo un análisis en profundidad de los aspectos evaluados por cada una de las metodologías.

Por último, en relación con la evaluación energética de edificios, se analizan, por un lado, los fundamentos y parámetros de cálculo que deben ser considerados y, por otro, las principales herramientas de simulación energética disponibles en el mercado, cuyo análisis aporta una comparativa entre todas ellas para asistir en la selección de aquellas más adecuadas según el enfoque que adquiera la evaluación energética.

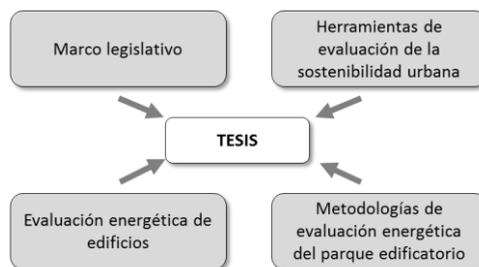


Figura 2.1 Áreas relacionadas con la tesis

2.2 MARCO LEGISLATIVO

Como consecuencia de la creciente preocupación frente al cambio climático, desde el año 1995 se vienen celebrando las llamadas Conferencias de las Partes (COP, acrónimo de *Conference of the Parts*) dando lugar a los tratados internacionales que buscan el acuerdo entre los diversos países. Es especialmente destacable la COP del año 1997, en la que se gestó el Protocolo de Kioto, el cual supuso por primera vez un compromiso por parte de los países industrializados de reducir sus emisiones de GEI en los sectores energético, industrial, agrícola, de cambio de uso de la tierra, silvicultura y desechos. El principal objetivo era conseguir un recorte conjunto de los GEI en un 5% con respecto a los niveles de 1990, en el periodo de 2008-2012. Durante la celebración del mismo, se admitió que no era posible alcanzar niveles similares a los que existían anteriormente a la revolución industrial, momento en que las emisiones a la atmósfera comenzaron a superar lo que la misma podía procesar, pero al menos, se estableció el compromiso de mantener el calentamiento global por debajo de 2°C, compromiso que no ha podido ser satisfecho por las partes a día de hoy.

El protocolo de Kioto no entró en vigor hasta el año 2004 con la ratificación por parte de Rusia, con la que se superaba el porcentaje de países necesarios, pero, finalmente no todos los países lo ratificaron. Países altamente contaminantes como Estados Unidos o China, no se adhirieron al protocolo. Así, el mismo solo fue el precursor de multitud de sucesivas COP que no llegaron a acuerdos firmes. La última COP celebrada en París en diciembre de 2015, supone el primer acuerdo en el que tanto las naciones desarrolladas como los países en vías de desarrollo se comprometen a gestionar la transición hacia una economía baja en carbono. Para ello, se establece el objetivo de lograr que el aumento de las temperaturas se mantenga bastante por debajo de los 2°C y compromete a los firmantes a realizar esfuerzos para limitar el aumento de las temperaturas a 1,5°C en comparación con la era preindustrial. El texto aprobado deberá ahora ser ratificado por 55 países que representen al menos 55% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero.

Dentro del contexto europeo, se apunta al sector de la edificación como uno de los grandes consumidores de energía. Concretamente, el 40% del consumo total de energía en la Unión Europea corresponde a los edificios (Comisión Europea, 2010). Teniendo en cuenta que el sector se encuentra en fase de expansión, se prevé que el consumo de energía siga en aumento en los próximos años. Por ello, la reducción del consumo de energía y el uso de energía procedente de fuentes renovables en el sector de la edificación constituyen una parte importante de las medidas necesarias para reducir la dependencia energética y las emisiones. Las medidas adoptadas para reducir el consumo de energía permitirán, junto con un mayor uso de la energía procedente de fuentes renovables, que la Unión Europea cumpla sus compromisos de mantener el aumento de la temperatura global por debajo de 1,5°C y su compromiso de reducir, para 2020, las emisiones totales de gases de efecto invernadero en un 20% como mínimo con respecto a los niveles de 1990 y en un 30% en el caso de lograrse un acuerdo internacional.

La reducción del consumo de energía y un mayor uso de la energía procedente de fuentes renovables desempeñan asimismo un papel importante a la hora de fomentar la seguridad del abastecimiento energético y el desarrollo tecnológico y de ofrecer oportunidades de empleo y desarrollo regional, especialmente en zonas rurales.

En este apartado, se analiza el marco legislativo en relación a la eficiencia energética de edificios, en los contextos europeo y nacional.

2.2.1 MARCO LEGISLATIVO EN EL CONTEXTO EUROPEO

Las Directivas Europeas que han contribuido al objetivo de la eficiencia energética de los edificios tienen como precursora a la Directiva 93/76/CEE, de 13 de septiembre de 1993, relativa a la limitación de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) mediante la mejora de la eficacia energética (Comisión Europea, 1993). Dicha directiva apuntó al sector de la edificación como uno de los grandes responsables en lo relativo al consumo energético y emisiones de CO₂ en Europa y propuso la certificación energética como herramienta necesaria para conseguir su reducción, recomendando a los estados miembros su puesta en vigor antes de 1995. Sin embargo, su falta de concreción, así como la gran inercia en el sector de la edificación en algunos países, provocó implantaciones muy desiguales entre los estados. Países como Dinamarca y Alemania fueron los primeros en establecer nuevas demandas energéticas restrictivas y métodos para la certificación energética de edificios. Sin embargo, países como Francia, Italia y España han tardado considerablemente más, concretamente en el caso español no se estableció hasta el año 2007.

Posteriormente se promulgaron las directivas conocidas con el acrónimo EPBD (*Energy Performance of Buildings Directive*), que recogen ya los objetivos del protocolo de Kioto. La primera fue la Directiva 2002/91/CE, que trataba específicamente el comportamiento energético de los edificios (Comisión Europea, 2002). Dicha directiva supuso un avance efectivo y concreto de las líneas de acción que ya fueron indicadas en la Directiva 93/76/CEE para el sector de la edificación. Con ella, entre otras cosas, se pretendía reducir las grandes diferencias entre los estados miembros e instar a establecer una metodología de cálculo de la eficiencia energética integrada de los edificios, que llevase al sector de la edificación a niveles de comportamiento energético superiores a los entonces actuales, que debía comprender los siguientes aspectos:

- Aislamiento térmico
- Instalaciones de calefacción y aire acondicionado
- Utilización de fuentes de energía renovables
- Tener en cuenta el diseño del edificio

La EPDB 2002 incide especialmente en los edificios de nueva construcción, dejando a los edificios existentes relegados a un segundo plano, ya que únicamente obliga a actuar en aquellos grandes edificios con una superficie mayor a 1.000 m², que sean objeto de reformas importantes. Así, la directiva define como reformas importantes los casos en que los costes totales de la renovación referentes al cerramiento exterior del edificio o a instalaciones energéticas tales como calefacción, suministro de agua caliente, aire acondicionado, ventilación e iluminación, sean superiores al 25% del valor del edificio, excluyendo el valor del terreno en el que está construido, o cuando se renueva más del 25% del cerramiento exterior del edificio. Indica además que, no obstante, la mejora de la eficiencia energética global de un edificio existente no significa necesariamente una renovación total del edificio, sino que puede limitarse a aquellas partes que sean más importantes para la eficiencia energética del edificio y tengan una rentabilidad adecuada. Por tanto, sólo en casos muy concretos existía la obligatoriedad de actuar en ellos, lo que no promovía la renovación del parque existente edificatorio.

Por otro lado, establece la obligatoriedad de inspeccionar periódicamente las calderas y sistemas de aire acondicionado de edificios y evaluar el estado de la instalación de calefacción con calderas de más de 15 años.

Posteriormente, y ante la evidencia de que no se iban a alcanzar los compromisos de Kioto, surge la Directiva EPDB 2010/31/UE de 19 de mayo (Comisión Europea, 2010), cuyo texto refundido aumenta las exigencias en cuanto a eficiencia energética y modifica y añade algunos aspectos a la

anterior directiva. Entre otras novedades, establece que la metodología de cálculo de la eficiencia energética debe tener en cuenta, además de los aspectos de la EPDB 2002, los siguientes:

- Elementos pasivos de calefacción y refrigeración
- Sombreado
- Calidad del aire interior
- Iluminación natural

Ello denota que el diseño del edificio y el uso de estrategias pasivas comienzan a cobrar importancia para afrontar el reto de reducir la demanda energética y las emisiones de CO₂ en los edificios.

En cuanto a los edificios existentes, se mantiene la obligatoriedad de cumplir la normativa en los edificios que sean objeto de reformas importantes, pero se introducen ciertas modificaciones. La principal es que se elimina el límite de superficie, por lo que se establece que en todos los edificios existentes en los que se renueven elementos, dichos elementos deben adaptarse a los requisitos mínimos de eficiencia energética, priorizando aquellos que tengan más relevancia para la eficiencia energética del edificio, con criterios de coste-efectividad. La directiva deja a potestad de los estados miembros la tarea de definir el concepto de reforma importante, bien en términos del valor del edificio (como el valor actuarial o el valor actual basado en el coste de la reconstrucción, excluyendo el valor del terreno), o bien en términos de porcentaje de renovación de envoltente.

Entre otras cosas, respecto a la eficiencia energética de los edificios, se incorpora la necesidad de recomendar medidas de mejora energética teniendo en cuenta su viabilidad económica, para conocer el periodo de retorno de la inversión.

También establece la obligatoriedad de certificar energéticamente aquellos inmuebles que vayan a ser alquilados o vendidos y que sean públicas las calificaciones alcanzadas para el nuevo comprador o arrendatario, añadiendo así un criterio más de elección para el usuario. También deberá ser visible la etiqueta energética en edificios en los que una autoridad pública ocupe una superficie útil total superior a 250 m².

La Directiva de 2010 también insta a la redacción de Planes Nacionales destinados a aumentar el número de edificios de consumo de energía casi nulo, proporcionando una definición poco concreta sobre los mismos: “los edificios de consumo de energía casi nulo son edificios con un nivel de eficiencia energética muy alto, cuyos requerimientos bajos de energía quedan mayoritariamente cubiertos por energía procedente de fuentes renovables, incluida energía procedente de fuentes renovables producida in situ o en el entorno”. La directiva otorga la responsabilidad de concretar dicha definición a los estados miembros, lo que genera ciertas desigualdades en la interpretación del concepto de edificio de consumo de energía casi nulo y en la temporalidad, no estando todavía definida en el caso de España. Algunos de ellos relacionan el concepto con las emisiones de CO₂, mientras que otros, prefieren asociarlo al consumo de energía o la autosuficiencia energética. Junto a esta definición, establece la fecha límite de construcción de edificios de consumo de energía casi nulo en el 31 de diciembre de 2020 para los edificios nuevos y en el 31 de diciembre de 2018 para edificios nuevos que sean propiedad de autoridades públicas.

Por otro lado, y más recientemente, surge la Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012 (Comisión Europea, 2012), relativa a la eficiencia energética, por la que se modifican las Directivas 2009/125/CE (Comisión Europea, 2009) y 2010/30/UE en lo referente a etiquetado de productos relacionados con la energía, y por la que se derogan las Directivas 2004/8/CE (Comisión Europea, 2004) y 2006/32/CE sobre eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos (Comisión Europea, 2006). Con ella se pretende establecer un marco común de medidas para el fomento de la eficiencia energética dentro de la Unión Europea y

alcanzar los objetivos de la Estrategia Europa 20/20/20 (20% (30%) reducción emisiones efecto invernadero, aumento del 20% energías renovables, aumento del 20% eficiencia energética). Esta nueva directiva afecta a normas destinadas a eliminar barreras en el mercado de la energía y a superar deficiencias que obstaculizan la eficiencia en el abastecimiento y el consumo de energía y dispone también el establecimiento de objetivos nacionales orientativos de eficiencia energética para el año 2020. Esta complementa a la EPDB 2010 relativa a la eficiencia energética de edificios, en lo referente a la función ejemplarizante de los edificios de los organismos públicos.

La Figura 2.2 resume la evolución de las directivas europeas en material de eficiencia energética.

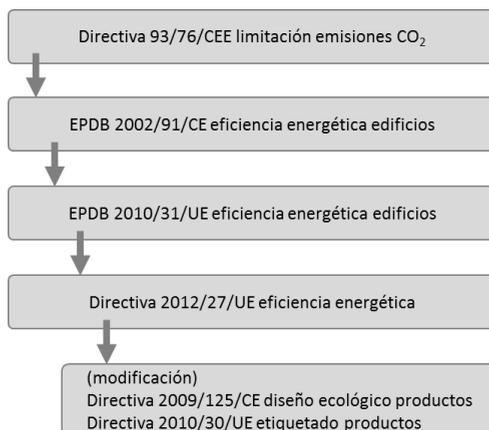


Figura 2.2 Evolución de las directivas europeas relacionadas con la eficiencia energética

2.2.2 MARCO LEGISLATIVO EN EL CONTEXTO NACIONAL

En España, hasta el año 1979 no se publica ninguna normativa en lo referente a ahorro de energía en los edificios. Con la Norma Básica de la Edificación sobre Condiciones Térmicas en los edificios (NBE-CT-79, 1979), se introduce la necesidad de reducir las pérdidas térmicas a través de los cerramientos, evitar el riesgo de formación de condensaciones en los mismos y mejorar su confort térmico interior. La norma establece unos límites de transmisión global de calor a través del conjunto del cerramiento, definidos por el denominado coeficiente K_G , según la zona climática y el factor de forma del edificio. Ello supone, según zonas climáticas, la incorporación de aislamiento térmico en algunos de los cerramientos de la envolvente, así como la inclusión de vidrios dobles, para conseguir reducir dicho coeficiente.

Con la entrada en vigor de la EPDB 2002, esta se transpone a la normativa española, parcialmente, por medio del RD 314/06 de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación (CTE, 2006). El CTE consta de varios documentos que derogan las antiguas Normas Básicas de la Edificación (NBE). A efectos energéticos, corresponde al Documento Básico de Ahorro de Energía (DB HE) establecer los nuevos estándares de confort térmico y adecuarlos a la realidad de una España muy alejada de lo que era en la década de los 70. Sin embargo, la implementación del CTE DB HE llega, en cierta manera, algo tarde, pues el fuerte crecimiento del sector de la construcción, que dejó un extenso legado de nuevos edificios, tuvo su auge precisamente en los años previos a la aprobación de dicha normativa, lo que deja a una gran parte del parque edificatorio lejos de los estándares actuales de eficiencia energética.

El documento DB HE1 tiene como objetivo limitar la demanda energética de los edificios. En este se definen aspectos clave para aumentar la eficiencia energética, como es la mejora de la envolvente térmica y sus limitaciones de transmitancia térmica, según zonas climáticas. Este documento establece para cada uno de los tipos de cerramientos una limitación de transmitancia térmica (U) y de condensaciones, y establece dos procedimientos para la verificación de su cumplimiento, la opción simplificada (cumplimentación de fichas) y la opción general (mediante la herramienta LIDER). El endurecimiento de los requisitos con respecto a la NBE CT-79 hace aumentar los espesores de aislamiento térmico en los elementos de la envolvente y mejorar también las prestaciones de las carpinterías.

El documento DB HE2 hace referencia a las instalaciones térmicas de los edificios y remite al Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) (Ministerio de la Presidencia, 2007a), a través del cual también se transpone parcialmente la EPDB 2002. El DB HE3 se centra en las instalaciones de iluminación y los DB HE4 y HE5 aseguran una cierta presencia de energías renovables para el funcionamiento del edificio.

Además, para dar respuesta a la incorporación de una metodología para la certificación energética de edificios, como establece la EPDB 2002, se desarrolló el RD 47/2007, de 19 de enero, por el que se aprobó el Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción (Ministerio de la Presidencia, 2007b) y que entró en vigor el 30 de abril de 2007. Asimismo, en 2007 se aprobó una revisión del RITE, que establecía las condiciones que debían cumplir las instalaciones destinadas a atender la demanda de bienestar térmico e higiene, a través de las instalaciones de calefacción, climatización y agua caliente sanitaria, para conseguir un uso racional de la energía.

Cuando los procedimientos normativos comienzan a ver la luz en el territorio español, tiene lugar la aprobación de la EPDB 2010, que obliga de nuevo a adaptar las exigencias. Así pues, no fue hasta el año 2013 cuando se aprueba la modificación del DB HE (CTE, 2013). El nuevo CTE introduce como novedad un nuevo Documento Básico, el DB HE0, que tiene como objetivo limitar el consumo de energía. Para ello, establece unos límites de consumo energético en los edificios, según su uso y zona climática en la que se ubican. El DB HE1 también sufre importantes modificaciones, especialmente en cuanto al procedimiento de verificación, que ya establece la opción general como único procedimiento, la cual implica el manejo de la Herramienta Unificada LIDER-CALENER (Universidad de Sevilla, 2013), basada en la simulación dinámica. Los requisitos se endurecen significativamente y la nueva normativa ya no centra el cumplimiento únicamente en la limitación de la transmitancia térmica de los elementos de la envolvente, sino que señala como aspecto clave el propio diseño del edificio para reducir la demanda energética. Además, el nuevo DB HE1 incluye a los edificios existentes y obliga a que estos cumplan unas exigencias mínimas cuando se renueve algún elemento de su envolvente térmica o vayan a ser objeto de reformas importantes, término ya definido anteriormente.

En lo relativo a la certificación energética, se aprueba un nuevo procedimiento mediante el RD 235/2013 (Ministerio de la Presidencia, 2013), que engloba también a los edificios existentes. Además, establece la obligatoriedad de exhibir la etiqueta energética en edificios para la venta y el alquiler, y poner a disposición del ciudadano un registro oficial de certificados energéticos, que deja a potestad de las Comunidades Autónomas. En la Comunidad Valenciana, el Decreto 112/2009 del Consell, regula las actuaciones en materia de eficiencia energética de edificios (GVA, 2009) y designa al Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial (IVACE) como órgano competente para el seguimiento de la certificación de eficiencia energética de edificios y encargado de coordinar y mantener el registro.

En lo que respecta al parque edificado, la construcción de viviendas en España sigue una tendencia ascendente, como se muestra en la Figura 2.3, alcanzando su mayor auge en las décadas de los años

1960 y 1970, con 3,6 y 5 millones de viviendas construidas, respectivamente. Sin embargo, la legislación anteriormente mencionada comienza a tener su efecto a lo largo de la década de 1980, de manera que, el 54,10% del parque de viviendas españolas existente en la actualidad carece de los estándares necesarios, dejando a gran parte del parque de edificios residenciales obsoleto. Ello pone de manifiesto la necesidad que existe en intervenir sobre el mismo y desarrollar los mecanismos adecuados para llevar a cabo, no solo su conservación, sino también su rehabilitación energética.

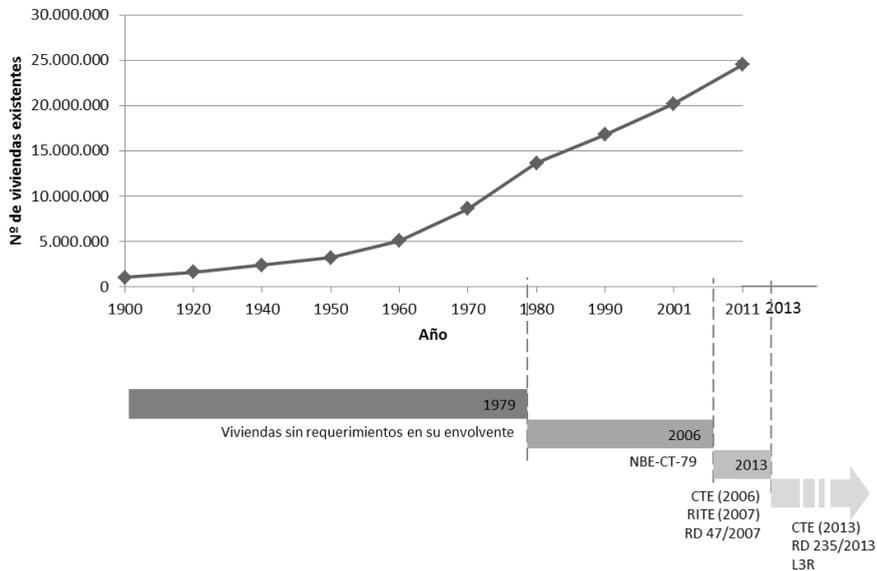


Figura 2.3 Evolución de viviendas construidas a lo largo del siglo XX e inicios del XXI y relación con la legislación española (elaboración propia a partir de datos del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2011))

Junto con las novedades introducidas en la legislación en relación a los edificios existentes, se aprueba en el año 2013, la Ley 8/2013 de 26 de junio, de rehabilitación, regeneración y renovación urbanas (L3R) (Gobierno de España, 2013), con un enfoque claramente urbano y centrado en la ciudad consolidada, que tiene como principales objetivos:

- Potenciar la rehabilitación edificatoria y la regeneración y renovación urbanas, eliminando trabas actualmente existentes y creando mecanismos específicos que la hagan viable y posible.
- Ofrecer un marco normativo idóneo para permitir la reconversión y reactivación del sector de la construcción, encontrando nuevos ámbitos de actuación, en concreto, en la rehabilitación edificatoria y en la regeneración y renovación urbanas.
- Fomentar la calidad, la sostenibilidad y la competitividad, tanto en la edificación, como en el suelo, acercando nuestro marco normativo al marco europeo, sobre todo en relación con los objetivos de eficiencia, ahorro energético y lucha contra la pobreza energética.

Así, con esta nueva ley, basada en un enfoque más amplio, el urbano, se pretende corregir el desequilibrio estructural que existía en el ordenamiento urbanístico y jurídico en nuestro país, en lo referente a la planificación urbanística de nuevos desarrollos y a la intervención sobre los tejidos existentes (Rubio del Val, 2015), y así se expresa en una de las razones que motivan la ley: “la

tradición urbanística española [...], se ha volcado fundamentalmente en la producción de nueva ciudad, descompensando el necesario equilibrio entre dichas actuaciones y aquellas que, orientadas hacia los tejidos urbanos existentes, permiten intervenir de manera inteligente en las ciudades, tratando de generar bienestar económico y social y garantizando la calidad de vida a sus habitantes”.

No obstante, la ley L3R, además de centrar sus esfuerzos en corregir este desequilibrio, pretende crear un nuevo marco normativo que facilite la gestión y contribuya a lograr la financiación de las actuaciones, coordinadas a través de las comunidades de propietarios u otras figuras de gestión, mientras no exista un desarrollo legal que canalice los obstáculos legales que persisten e impiden la puesta en práctica de las actuaciones de rehabilitación, regeneración y renovación.

Cabe indicar, como apunta Rubio del Val (2015), que se debe discernir entre las operaciones de mero mantenimiento y conservación del edificio y las actuaciones de rehabilitación, persiguiendo estas últimas la actualización del edificio a los estándares de aislamiento térmico, instalaciones básicas y accesibilidad, que permanece todavía hoy en el ámbito de la actuación voluntaria por parte de las comunidades de propietarios. Destaca también que la ley L3R facilita notablemente las cosas a quien quiera promover actuaciones de rehabilitación, eliminando algunos obstáculos existentes en la legislación (Ley de Propiedad Horizontal, CTE, etc.), siempre que se haga en ámbitos delimitados y aprobados por las administraciones competentes, y siempre, de la mano de estas, que como se menciona en el Capítulo 1, adquieren un papel muy relevante que será clave para la regeneración de la ciudad consolidada.

2.3 REVISIÓN DE HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD URBANA (HESU)

Desde la aparición del término Desarrollo Sostenible (Brundtland, 1987), se han realizado numerosos esfuerzos para medir el nivel de sostenibilidad de sistemas urbanos a través de indicadores (OECD, 2014). Desde mediados de los años 1990, las autoridades locales han afrontado diversos retos dentro del contexto de políticas encaminadas a alcanzar la sostenibilidad urbana, principalmente en Europa y Norte América (Bulkeley, 2010). Los primeros indicadores sobre desarrollo sostenible emergieron de una recomendación establecida por la Agenda 21 (United Nations, 1995), dirigida a identificar y desarrollar indicadores que pudieran proporcionar una base sólida durante los procesos de decisión a todos los niveles (regional, nacional e internacional). A su vez, la recomendación establecía que los indicadores propuestos debían quedar recogidos en una base de datos ampliamente accesible y actualizada regularmente (UN Sustainable Development, 1998).

La lista de los indicadores de sostenibilidad incluía un total de 134 indicadores, de los cuales, los países involucrados en la Agenda 21 fueron invitados a hacer una selección para adaptar dichos indicadores a su contexto propio. Sin embargo, tras haber implementado los indicadores en 22 países y tras los procesos de participación que se llevaron a cabo para intercambiar experiencias y buenas prácticas, se concluyó que no todos los indicadores citados en la lista eran relevantes en el contexto globalizado de los países, ya que no estaban expresamente enfocados a las características específicas de cada contexto. Por otro lado, debido a la excesiva extensión de la lista, a los elevados tiempos requeridos para su implementación y al bajo nivel de fluidez durante las consultas, la mayoría de los países priorizaron para su implementación criterios como la asequibilidad, la accesibilidad a datos e información, la utilidad y la relevancia en las políticas abordadas.

La necesidad de desarrollar indicadores de sostenibilidad adaptados al contexto específico de cada región es obvia y, en consecuencia, numerosas herramientas para evaluar la sostenibilidad en barrios y ciudades han sido ya desarrolladas (Castanheira y Bragança, 2014).

Tras el surgimiento del *Building Research Establishment Environmental Assessment Method* (BREEAM) en Reino Unido en el año 1990, dirigido a evaluar ambientalmente los edificios, han surgido muchas otras herramientas en el ámbito internacional con el mismo objetivo (Haapio y Viitaniemi, 2008; Huedo y López-Mesa, 2013). Actualmente, sin embargo, los esfuerzos van más allá y la comunidad científica muestra un creciente interés por evaluar no sólo el edificio como un elemento aislado sino por considerar aspectos más complejos que lo interrelacionan con su entorno construido. Así pues, surgen las herramientas cuyo objetivo es evaluar la sostenibilidad a una escala mayor que la del edificio, aproximándose a la escala de ciudad. Estas son, las herramientas de evaluación de la sostenibilidad urbana (HESU).

A nivel internacional, cabe destacar como herramientas de elevado nivel de reconocimiento: *Leadership in Energy and Environment Design for Neighborhood Development* (LEED ND) en 2009 (US GBC, 2009), *Building Research Establishment Environmental Assessment Method* (BREEAM Communities) en 2007 (BRE Global, 2011), *Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency for Urban Development* (CASBEE UD) en 2006 (IBEC, 2007), *Haute Qualité Environnementale et Economique Réhabilitation* (HQE2R) en 2001 (Blum, 2007), Ecocity en 2002 (Gaffron et al., 2005), *Sustainable Community Rating* (SCR) en 2007 (SCR, 2014), *EarthCraft Communities* (ECC) en 2003 (EarthCraft, 2014), *Sustainable Urban Planning Decision support accountinG for Urban metabolism* (BRIDGE) en 2013 (Chrysoulakis et al., 2013) y *Key Indicators for Territorial Cohesion and Spatial Planning* (KITCASP) (Daly et al., 2013).

En el contexto español, existe la herramienta VERDE, que fue desarrollada para evaluar únicamente el edificio (Macías y García Navarro, 2010). A nivel urbano, Mercader-Moyano et al. (2015) desarrollaron un sistema de indicadores de sostenibilidad específicamente enfocado a la rehabilitación de la tipología de barriadas típicas de la España de las décadas de los 60 y 70. Sin embargo, no se han desarrollado hasta la fecha herramientas con un enfoque meramente urbano. No obstante, existen publicaciones que establecen directrices a seguir para la implementación de criterios sostenibles en ciudades españolas, como por ejemplo: el Libro Blanco de la Sostenibilidad en el Planeamiento Urbanístico Español (LB) (Ministerio de Vivienda del Gobierno de España, 2010), Sistema Municipal de Indicadores de Sostenibilidad (SMIS) (Grupo de trabajo de Indicadores de Sostenibilidad de la Red de Redes de Desarrollo Local Sostenible, 2010), Sistema de Indicadores y Condicionantes para Ciudades Grandes y Medianas (CGYM) (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010). Además, algunos sistemas de indicadores han sido específicamente desarrollados para ciudades concretas, como es el caso del Plan Especial de Indicadores de Sostenibilidad Ambiental de la Actividad Urbanística de Sevilla (SEV) (Agencia de Ecología Urbana de Barcelona, 2007), *Sistema Municipal d'Indicadors de Sostenibilitat de la Diputació de Barcelona* (BCN) (Diputación de Barcelona, 2009) e Indicadores de Sostenibilidad de Bilbao (BIL) (Ayuntamiento de Bilbao, 2008).

Hasta la fecha, aunque se han llevado a cabo análisis cualitativos de las herramientas y sistemas de indicadores (Bourdic et al., 2012; Gil y Duarte, 2013; Haapio, 2012; Nguyen y Altan, 2011), el primer análisis cuantitativo fue el realizado por Luederitz et al. (2013), quienes clasificaron los indicadores presentes en la literatura en 17 categorías y cuantificaron el número de artículos en cada una de ellas. No obstante, en su estudio, no todos los criterios de la sostenibilidad son abordados por estas 17 categorías y los indicadores incluidos en ellas no fueron analizados en gran profundidad. Sharifi y Murayama (2013) realizaron un análisis comparativo de 7 herramientas (LEED ND, BREEAM Communities, CASBEE UD, HQE2R, Ecocity, SCR y ECC) a través del cual destacaron las fortalezas y debilidades de cada una de ellas, propusieron recomendaciones de mejora y sugirieron un conjunto de temas y criterios para agrupar a los indicadores contenidos en ellas, lo que permitió identificar el

grado de énfasis puesto en cada uno de los aspectos. La mayoría de autores coinciden en que las tres herramientas de referencia (LEED ND, BREEAM *Communities* y CASBEE UD) carecen de robustez dado el uso indistinto de criterios cualitativos y cuantitativos, los cuales se encuentran mezclados en una misma escala de evaluación, a pesar de que esta es cuantitativa. De sus conclusiones, se identifica la necesidad de establecer sistemas de indicadores capaces de evaluar objetivamente y con transparencia los diferentes aspectos de las dimensiones de la sostenibilidad, haciendo uso de indicadores que sean cuantificables y que puedan ser comparados por medio de una escala de valoración.

Se analiza pues, a continuación, el conjunto de 13 sistemas de indicadores y herramientas de referencia, citados anteriormente. La selección se basa en el criterio territorial (escala internacional, nacional y regional) y temporal (herramientas recientemente desarrolladas, desde 2005 hasta el presente). Estas son: tres herramientas a escala internacional aplicables universalmente (BREEAM *Communities*, LEED ND y CASBEE UD), dos herramientas desarrolladas *ad hoc* en el ámbito Europeo (ECOCITY y *Le Modele* INDI-RU 2005), ambas integradas en el marco de proyectos europeos; otros dos recientes proyectos europeos (BRIDGE y KITCASP) y, por último, seis sistemas de indicadores desarrollados en España que pueden ser aplicados en todo el ámbito nacional (LB, SMIS, CGYM), solo en regiones (BCN y BIL) o incluso, únicamente a escala de ciudad (SEV).

La Tabla 2.1 presenta las características principales de cada herramienta: desarrollador, año de publicación, país de origen y potencial de aplicación a otras regiones o países, alcance, necesidad de evaluación por terceras partes y sistema de puntuación o evaluación, en su caso.

Tabla 2.1 Principales características de las HESU analizadas

Herramienta	Referenda	Desarrollador	País/Región	Año public.	Última versión	Alcance	Asesor acreditado	Sistema de puntuación
LEED ND	(US GBC, 2009) (US GBC, 2009)	United States Green Building Council (USGBC) Congress for the New Urbanism (CNU) Natural Resources Defense Council (NRDC)	US (adaptable a otras regiones del mundo)	2006	2009	Escala de barrio, incluyendo edificios residenciales y no residenciales, nuevos desarrollos urbanos y proyectos de regeneración	Opcional	Platinum ≥80 Gold ≥60 Silver ≥50 Certified ≥40
BREEM Communities	(BRE Global, 2011) (BRE Global, s. f.)	Building Research Establishment Ltd (BRE Global)	UK (adaptable a otras regiones del mundo)	2007	2011	Escala urbana, incluyendo edificios residenciales y no residenciales, nuevos desarrollos urbanos y proyectos de regeneración	Requerido	Outstanding ≥85 Excellent ≥70 Very Good ≥55 Good ≥40 Pass ≥25 Unclassified <25
CASBEE UD	(IBEC, 2007)	Japan Sustainable Building Consortium (JSBC) Japan Green Building Council (JaGBC)	Japón (aplicable a Japón y a otras regiones asiáticas)	2006	2007	Grupos de edificios y barrios periféricos (se excluye el interior de los edificios) Proyectos nuevos y de regeneración urbana	Requerido	Excellent (BEE≥3) Very Good (BEE≥1.5) Good (BEE≥1) Fairly Poor (BEE≥0.5) Poor (BEE<0.5)
ECOCITY	(Gaffron et al., 2005) (Gaffron, Huismans, & Skala, 2008)	European Commission Ph. Gaffron, G. Huismans y F. Skala (Coordinadores)	Europa (7 países europeos: Austria, España, Hungría, Finlandia, Slovakia, Alemania, Italia) (aplicable en el contexto europeo)	2002-2005	2005	Escala de barrio y ciudad Aplicable en el contexto europeo	El sistema proporciona consultoría opcional, no obligatoria	-
Le Modèle INDI-RU 2005	(Charlot-Valdieu & Outrequin, 2005)	SUDEN (Association européenne pour un développement urbain durable). Coordinadores: -Catherine Charlot-Valdieu, La CALADE (Conseil et Recherche en Développement Durable) -Philippe Outrequin, SUDEN	Francia (adaptable a otras regiones del mundo)	2005	2010	Escala de barrio y ciudad	-	-

Tabla 2.1 Principales características de las HESU analizadas (continuación)

Herramienta	Referenda	Desarrollador	País/Región	Año public.	Última versión	Alcance	Asesor acreditado	Sistema de puntuación
The BRIDGE project (Sustainable Urban Planning Decision support accounting for Urban metabolism)	(Chrysoulakis et al., 2013) (González, Donnelly, Jones, Chrysoulakis, & Lopes, 2013)	European Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013). 14 socios: Foundation for research and technology- Hellas King'S College London Consiglio Nazionale delle Ricerche Instytut Ekologii Terenow Uprzemyslowiowych Technical University of Madrid University of Aveiro University of Basel Trinity College Dublin University of Helsinki National and Kapodistrian University of Athens Centro Euro-Mediterraneo per l Cambiamenti Climatici Meteo-France Centre National de Recherches Meteorologiques Alterra University of Southampton	Europa (5 ciudades europeas: Helsinki, Atenas, Londres, Florencia, Gliwice)	2013	2013	Escala de barrio y ciudad	-	-
KITCASP (Key Indicators for Territorial Cohesion and Spatial Planning)	(Gavin Daly & González, 2013) (Galvin Daly et al., 2013)	EU ESPON Programme. 5 socios: National University of Ireland London South Bank University Universitat Politècnica de Catalunya Centre Vidreme University of Applied Sciences	Europa	2013	2013	Escala nacional (en territorio europeo)	-	-
Libro Blanco de la Sostenibilidad en el Planeamiento Urbanístico Español (LB)	(Ministerio de Vivienda del Gobierno de España, 2010)	Ministerio de Vivienda Universidad Politécnica de Madrid	España	2010	2010	Territorio español	-	-

Tabla 2.1 Principales características de las HESU analizadas (continuación)

Herramienta	Referencia	Desarrollador	País/Región	Año public.	Última versión	Alcance	Asesor acreditado	Sistema de puntuación
Sistema Municipal de Indicadores de Sostenibilidad (SMIS)	(Grupo de trabajo de Indicadores de Sostenibilidad de la Red de Redes de Desarrollo Local Sostenible, 2010)	Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino / Ministerio de Fomento. Agencia de Ecología Urbana de Barcelona. Grupo de trabajo de Indicadores de Sostenibilidad de la Red de Redes de Desarrollo Local Sostenible (IV reunión)	España	2010	Sujeto a revisión tras ser puesto en práctica	Escala de barrio y ciudad Territorio español	-	-
Sistema de Indicadores y Condicionantes para Ciudades Grandes y Medianas (CGYM)	(Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010)	Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino / Ministerio de Fomento. Agencia de Ecología Urbana de Barcelona.	España	2010	Sujeto a revisión tras ser puesto en práctica	Municipios españoles con más de 50.000 habitantes	-	-
Plan Especial de Indicadores de Sostenibilidad Ambiental de la Actividad Urbanística de Sevilla (SEV)	(Agencia de Ecología Urbana de Barcelona, 2007)	Departamento de Urbanismo del Ayuntamiento de Sevilla. Agencia de Ecología Urbana de Barcelona	España /Sevilla	2007	2007	Ciudad de Sevilla Nuevos desarrollos urbano y proyecto de regeneración urbana	-	-
Sistema Municipal d'Indicadors de Sostenibilitat de la Diputació de Barcelona (BCN)	(Diputación de Barcelona, 2009)	Gerencia de Servicios de Medio Ambiente, Diputación de Barcelona <i>Xarxa de Ciutats i Pobles cap a la Sostenibilitat</i>	España /Municipios catalanes	2008	2008 2011 revisión de estructura	Escala de barrio y ciudad Municipios de la provincia de Barcelona	-	-
Indicadores de Sostenibilidad de Bilbao (BIL)	(Ayuntamiento de Bilbao, 2008)	Ayuntamiento de Bilbao	España /Bilbao	2005	2008	Ciudad de Bilbao Aplicable a otros municipios de la provincial de Vizcaya	-	-

Como se muestra en la Tabla 2.1, las herramientas presentan ciertas fortalezas y debilidades. Las tres herramientas con mayor reconocimiento internacional, LEED ND, BREEAM *Communities* y CASBEE UD, son aplicables dentro del territorio en el que se han desarrollado, Estados Unidos, Reino Unido y Japón, respectivamente. Sin embargo, las tres pueden adecuarse a otras regiones del mundo, siempre y cuando ciertos aspectos sean adaptados previamente al contexto específico de dichas regiones. Ello supone, por un lado, una ventaja, ya que su enfoque globalizado hace que se consideren aspectos generales reconocibles en todas las regiones del mundo. Pero, por otro lado, ello supone a su vez un inconveniente, y es que muchos de los indicadores incluidos suelen ser tan generales, que muchas veces es difícil que sean evaluados de forma justa en otras regiones en las que se aplique la herramienta. Además, quedan patentes en muchos de los indicadores propuestos, aspectos característicos del país de origen de las herramientas que en otros contextos son inexistentes, por lo que carece de sentido su implementación.

En cuanto al alcance de las herramientas, este se centra principalmente en barrios o áreas urbanas delimitadas, que en muchos casos alcanza también el ámbito de ciudad. Solo KITCASP, LB y SMIS abarcan el ámbito de todo un territorio nacional.

Con un mayor grado de profundidad, la Tabla 2.2 muestra cómo las herramientas están estructuradas e indica la naturaleza de los indicadores incluidos, según los siguientes aspectos:

- Estructura de indicadores: se refiere al modo en cómo los indicadores están organizados y clasificados. La nomenclatura varía de unas herramientas a otras, siendo: categorías, temas, objetivos, medidas, criterios, estrategias, etc., hasta el nivel último que es el de indicador.
- Tipo de sistema de indicadores: dependiendo de sus características inherentes, los indicadores pueden ser cualitativos o cuantitativos. Algunas herramientas mezclan ambos tipos de indicadores para establecer estrategias de sostenibilidad. Sin embargo, aquí el término cualitativo o cuantitativo se refiere al método general de valoración de la herramienta. Cuando esta establece una escala de valoración con pesos concretos asignados a cada indicador, se denomina cuantitativo, mientras que cuando no lo establece (aún pudiendo contener indicadores de tipo cuantitativo), se denomina cualitativo.
- Número de indicadores: indica el número de indicadores contenidos en cada herramienta. La lista exhaustiva de indicadores que contiene cada una de las herramientas analizadas se presenta en el Anexo I.
- Método de ponderación: se refiere al método utilizado de valoración o cuantificación del peso de cada indicador en relación al global de la herramienta.

Tabla 2.2 Estructura de indicadores de las HESU analizadas

Herramienta	Estructura	Tipo de sistema de indicadores	Nº ind.	Pre-requisitos ^c	Método de ponderación
LEED ND	5 categorías 44 indicadores	Cuantitativo	56	Incluye 12 pre-requisitos en las categorías (excepto Innovación), para obtener la certificación. (21% obligatorios)	No existe diferencia en el sistema de puntuación, según la región
BREEAM Comm.	9 categorías 63 indicadores	Cuantitativo	62+1 (innovat ion)	Incluye 15 pre-requisitos en algunas categorías (obtener al menos 1 punto), para obtener la certificación. (24% de los indicadores son obligatorios, y el 8% de la puntuación es obligatoria)	Diferente sistema de puntuación según la región de UK donde se implementa la herramienta (London, South East, South West, North East, North West, East Mids, West Mids, East England)
CASBEE UD	6 categorías (en dos secciones: Q ^a and L ^b), 31 subcategorías 82 indicadores	Cuantitativo	82	No existen pre-requisitos. (0% obligatorios)	Diferente sistema de puntuación según la localización donde se implementa la herramienta (centro de la ciudad o general)
ECOCITY	5 áreas 18 temas 39 objetivos 186 medidas	Cualitativo	189	No existen pre-requisitos. (0% obligatorios)	-
Le Modele INDI-RU 2005	5 objetivos 21 sub- objetivos 73 indicadores	Cualitativo	73	No existen pre-requisitos. (0% obligatorios)	-
BRIDGE	3 dimensiones 12 objetivos 28 indicadores	Cualitativo	28	No existen pre-requisitos. (0% obligatorios)	-
KITCASP	4 temas 20 indicadores	Cualitativo	20	No existen pre-requisitos. (0% obligatorios)	-
LB	7 criterios 19 estrategias 93 indicadores	Cualitativo	93	No existen pre-requisitos. (0% obligatorios)	-
SMIS	6 áreas 13 sub-áreas 39 indicadores	Cualitativo	39	No existen pre-requisitos. (0% obligatorios)	-
CGYM	7 áreas 18 sub- áreas 52 indicadores	Cualitativo	52	No existen pre-requisitos. (0% obligatorios)	-
SEV	7 áreas 44 indicadores	Cualitativo	44	No existen pre-requisitos. (0% obligatorios)	-
BCN	4 categorías 13 indicadores	Cualitativo	13	No existen pre-requisitos. (0% obligatorios)	-
BIL	12 categorías 34 indicadores	Cualitativo	34	No existen pre-requisitos. (0% obligatorios)	-

^aQ: calidad ambiental en el desarrollo urbano (*environmental quality in urban development*)

^bL: carga ambiental en el desarrollo urbano (*environmental load in urban development*)

^cPre-requisitos son las exigencias obligatorias que han de ser implementadas para obtener un nivel de certificación en la herramienta o sistema.

De las herramientas analizadas, solamente tres de ellas utilizan un método de ponderación cuantitativo (LEED ND, BREEAM *Communitites* y CASBEE UD). Por lo tanto, un método objetivo de cuantificación del nivel de cumplimiento de cada uno de los indicadores que proponen. Dos de las citadas herramientas (LEED ND y BREEAM *Communitites*) establecen, además, un conjunto de pre-requisitos que son necesarios cumplir poder alcanzar un nivel mínimo de sostenibilidad en la escala de ponderación que proponen.

Como se observa en la Tabla 2.2, la totalidad de las herramientas se estructuran en temáticas organizadas en categorías, subcategorías, estrategias, áreas o sub-áreas, las cuales intentan abordar diversos aspectos de la sostenibilidad urbana, hasta llegar al nivel más concreto, que son los propios indicadores.

Aquellas herramientas basadas en un método cualitativo no establecen un sistema para cuantificar el cumplimiento de las exigencias, sino que proponen una serie de estrategias o recomendaciones que deberían ser adoptadas para alcanzar la sostenibilidad. Por ello, los métodos cualitativos tienen, en la mayoría de los casos, el inconveniente de confiar en la subjetividad del agente que implementa la herramienta. No por ello, se consideran menos importantes, pues proponen estrategias muy pertinentes. En estos casos, la integración de un método de valoración contribuiría a implementar con objetividad y transparencia los indicadores.

Así pues, los indicadores contenidos en cada una de las herramientas merecen ser analizados en profundidad, ya que aquellos que hacen referencia al aspecto energético contribuirán a identificar los aspectos más relevantes que deben ser tenidos en cuenta a la hora de proponer la metodología en el presente trabajo. Con el objetivo de llevar a cabo un análisis exhaustivo de los indicadores contenidos en las herramientas y poder compararlas entre ellas, se presenta en el Anexo I el listado completo de indicadores.

2.4 REVISIÓN DE METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN ENERGÉTICA DEL PARQUE EDIFICATORIO

Las exigencias y objetivos establecidos por la Unión Europea sobre cambio climático en materia de reducción de emisiones de GEI y de mejora de la eficiencia energética (European Commission, 2008), son cada vez más restrictivos y su cumplimiento exige ser verificado desde un enfoque global que aborde la totalidad de regiones o incluso países. Por ello, en el sector edificatorio, las miras deben ir más allá de la escala edificio y acometer la complejidad de la escala urbana. Conocer el uso de energía asociado al parque residencial de edificios, especialmente el derivado de su fase de uso, resulta un factor clave para poder establecer políticas energéticas adecuadas e implementar medidas dirigidas a reducir el consumo de energía y, por tanto, las emisiones de GEI.

En los últimos años, se ha identificado un creciente interés por evaluar el uso de energía asociado al parque residencial de edificios (Uihlein y Eder, 2010). Hasta la fecha, se han desarrollado ya herramientas que evalúan el comportamiento energético de los edificios (Swan y Ugursal, 2009) e incluso, en algunos casos, desde una perspectiva más amplia, la urbana (Shimoda et al., 2004). Sin embargo, como consecuencia de la complejidad del parque edificatorio y de la heterogeneidad que presentan sus características físicas y técnicas, no resulta sencillo abordar la evaluación atendiendo a todas las particularidades del entorno. Por ello, se hace necesario el uso de modelos complejos que reflejen la realidad de las ciudades y que permitan estimar el comportamiento energético del parque edificado, teniendo en cuenta los diversos parámetros que pueden influir en el mismo. Estos modelos serán fundamentales para dar soporte a la formulación de conclusiones a una escala

urbana y servir como herramienta de ayuda en la toma de decisiones y en el planteamiento de políticas energéticas en el ámbito de la edificación.

Así pues, para dar respuesta a la gestión del uso de la energía en el entorno construido de una manera más sostenible y alcanzar los objetivos europeos establecidos para el año 2020, el comportamiento de las áreas urbanas debe ser estudiado como un conjunto (Jones et al., 2007). Como ya apuntaba Moffatt (2001), analizar el comportamiento ambiental de los componentes de los edificios es el mejor método disponible para alcanzar dicho objetivo, ya que los flujos de energía y de recursos son función de las relaciones dinámicas que ocurren entre la envolvente del edificio, su equipamiento, sus sistemas integrados y su funcionamiento. Utilizando modelos dinámicos a pequeña escala (la de edificio) y después agregando los resultados para trasladarlos a una escala mayor, es posible analizar y dar respuesta al uso de energía y al comportamiento ambiental o energético de un conjunto edificatorio con gran precisión.

Swan y Ugursal (2009) revisaron las técnicas de modelado utilizadas para predecir el consumo de energía e identificaron dos enfoques principales cuyas características son bien diferentes: el enfoque de abajo hacia arriba (*bottom-up*) y el enfoque de arriba hacia abajo (*top-down*). Ambas técnicas, así como sus fortalezas y debilidades, se describen en el siguiente apartado.

2.4.1 DOS ENFOQUES: *TOP-DOWN* Y *BOTTOM-UP*

2.4.1.1 El enfoque *top-down*

El enfoque *top-down* trata al sector residencial de edificios como un sumidero de energía, de manera que no es capaz de discernir los usos finales a los que esta energía se destina (calefacción, refrigeración, ACS, iluminación, etc.). Este método utiliza datos históricos disponibles a largo plazo y predice el uso de energía asociado al parque de edificios como una función de variables de gran escala.

Dentro de este enfoque se distinguen dos técnicas: la econométrica y la tecnológica. La primera está basada en indicadores macroeconómicos como son el producto interior bruto (PIB), tasas de empleo, índices de precios e ingresos o precio de la energía, mientras que la segunda atribuye el uso de energía a características más generales del parque de edificios como son las tendencias de las instalaciones, datos climáticos o tasas de construcción y demolición. No obstante, existen modelos que adoptan características de ambos métodos.

La principal ventaja de los modelos *top-down* es que pueden operar con datos globales acumulados que generalmente están amplia y fácilmente disponibles y que dependen de los valores energéticos del sector residencial, lo que le aporta cierta inercia al modelo. Como el sector residencial rara vez se somete a cambios energéticos importantes, es posible generar un modelo ponderado que proporcione una buena capacidad de predicción para las pequeñas desviaciones con respecto a la situación actual. Por ejemplo, si el sector residencial incrementa el número de unidades en un 2%, mediante un modelo *top-down* se puede predecir un incremento total en el consumo energético de un 1,5%, ya que las nuevas viviendas construidas consumirán menos energía al ser más eficientes de acuerdo con los nuevos parámetros establecidos en la legislación (Swan y Ugursal, 2009).

Sin embargo, la confianza únicamente en datos macroeconómicos e históricos representa precisamente el hándicap de este enfoque, ya que no tiene en cuenta los posibles cambios tecnológicos que pueden sucederse a lo largo del paso del tiempo y, por lo tanto, lo hace inservible para identificar las áreas específicas con potencial de mejora.

Como desventaja, también cabe destacar que los modelos *top-down* suelen conllevar una categorización incorrecta del parque de edificios, debido a la falta de detalle de los datos en los que apoyan.

2.4.1.2 El enfoque *bottom-up*

El enfoque *bottom-up* estima el uso de energía en un conjunto representativo de edificios para extrapolar los resultados de la escala de edificio a la escala regional o incluso nacional. Este enfoque abarca todos los modelos que utilizan datos de entrada de un nivel jerárquico inferior al nivel superior del sector en su conjunto. Los modelos *bottom-up* pueden explicar el consumo de energía de los usos finales individuales, viviendas individuales o grupos de viviendas para luego extrapolar las conclusiones extraídas y representar una región o nación, basándose en el peso representativo de la muestra modelada. Puesto que utiliza una información mucho más detallada de las características del edificio (constructivas y de equipamiento), desde este enfoque se permite modelar diferentes casuísticas inherentes del edificio y su entorno, como son su geometría, instalaciones térmicas o patrones de sombras del entorno.

Dentro de este enfoque se diferencian dos técnicas: las técnicas estadísticas y las técnicas de ingeniería (también conocidas como métodos físicos o empíricos):

- Las técnicas *bottom-up* estadísticas se utilizan para determinar la contribución de demanda energética de los usos finales, incluyendo aspectos de comportamiento obtenidos de simples facturas energéticas y encuestas. Este método, por tanto, confía en información histórica y utiliza el análisis de regresión para atribuir el consumo energético a usos finales individuales. Establecida la relación entre los usos finales y el consumo energético de un determinado número de viviendas representativo, con el modelo se puede estimar el consumo o uso global de la energía de un parque completo de edificios.
- Las técnicas *bottom-up* de ingeniería se utilizan para calcular el consumo de energía de los usos finales basándose en descripciones detalladas de una muestra representativa de edificios. Los métodos de ingeniería tienen en cuenta expresamente el consumo de energía de los usos finales a base de la especificación de potencias, uso de equipos y sistemas energéticos y/o la transferencia de calor y las relaciones termodinámicas. Este método permite además determinar el impacto de la implementación de nuevas tecnologías, así como identificar las áreas susceptibles de ser mejoradas.

Entre los datos de entrada comunes a ambas técnicas *bottom-up* se incluyen características como las propiedades de la vivienda (geometría, envolvente térmica, equipos y aparatos, etc.), las características del clima, las temperaturas interiores, los horarios de ocupación y las horas de uso de los equipos y aparatos. Este alto nivel de detalle representa un punto fuerte del modelo y le aporta la capacidad de modelar diferentes opciones tecnológicas y de generar diferentes escenarios. A su vez, esta ventaja se puede considerar en determinadas ocasiones como un inconveniente, por la gran cantidad de datos que son necesarios para proceder al cálculo y a la simulación del comportamiento energético de un edificio.

Una vez se ha determinado el consumo energético, el modelo permite calcular el consumo total sin necesidad de confiar en datos históricos. Otra capacidad del modelo es que permite abordar explícitamente el comportamiento de los ocupantes y otros aportes de energía alternativa, como son las ganancias solares pasivas. A pesar de que históricamente estos aportes de energía han sido descuidados durante el análisis energético, ahora son un punto de diseño importante en el que se hace hincapié para el estudio de tecnologías de energía alternativa (Swan y Ugursal, 2009).

Los métodos estadísticos atribuyen todo el consumo de energía global a los usos finales y, al hacerlo, incorporan el comportamiento de los ocupantes con respecto al uso y a la configuración del

equipamiento de las viviendas. Sin embargo, si no se contabilizan todas las fuentes de energía (como pueden ser las ganancias solares pasivas), la fiabilidad de las estimaciones sobre el consumo de energía global puede verse perjudicada.

En contraposición, el método de ingeniería basado en principios físicos, posee la capacidad de integrar estos niveles de consumo de energía adicional, incluyendo las energías alternativas. Sin embargo, el comportamiento de los ocupantes resulta difícil de integrar, ya que se ha demostrado que el comportamiento varía ampliamente y de forma impredecible. Como punto débil, Kavgić et al. (2010) identifican la falta de transparencia y cuantificación de las incertidumbres inherentes y la falta de datos públicos disponibles en lo que respecta a consumos de energía reales, los cuales pueden ayudar a identificar las tendencias tecnológicas y sociales del parque existente de edificios.

Así pues, los modelos *bottom-up* proporcionan una base esencial para el desarrollo de Sistemas Urbanos de Gestión Medioambiental (*Urban EMS-Urban Environmental Management Systems*), los cuales funcionan de forma similar que los estándares ISO, pero sustituyendo una entidad (como es una empresa o industria) por una entidad geográfica, como puede ser una ciudad o región. Además, el modelo *bottom-up* permite su integración con los Sistemas de Información Geográfica (SIG), proporcionando una interfaz visual, aspecto que se abordará en capítulos posteriores.

La agregación del parque edificatorio (*Stock Aggregation*) (Moffatt, 2001) constituye el proceso para evaluar el comportamiento energético de un edificio utilizando la evaluación ambiental de los componentes de todo un parque de edificios (*stock*). Como se basa en datos detallados de una muestra representativa de edificios para posteriormente extrapolar los resultados a una escala urbana, el proceso de agregación del parque edificatorio está basado en el enfoque *bottom-up*. Los métodos que siguen este proceso pueden contribuir a la toma de decisiones de dos formas. Por un lado, pueden asistir durante el diseño de un edificio acerca de cómo las diferentes variables que intervienen en el proceso pueden afectar al comportamiento energético, y por otro, pueden proporcionar apoyo durante la elaboración de políticas y durante el diseño del planeamiento urbano a diferentes escalas (local, regional o nacional), generando una base de datos con aspectos energéticos, ambientales, de recursos y también relacionados con el coste.

2.4.1.3 Comparativa entre el enfoque *top-down* y *bottom-up*

A modo de síntesis, la Figura 2.4 esquematiza gráficamente el funcionamiento de los modelos *top-down* y *bottom-up* y sus perspectivas descendente y ascendente, respectivamente.

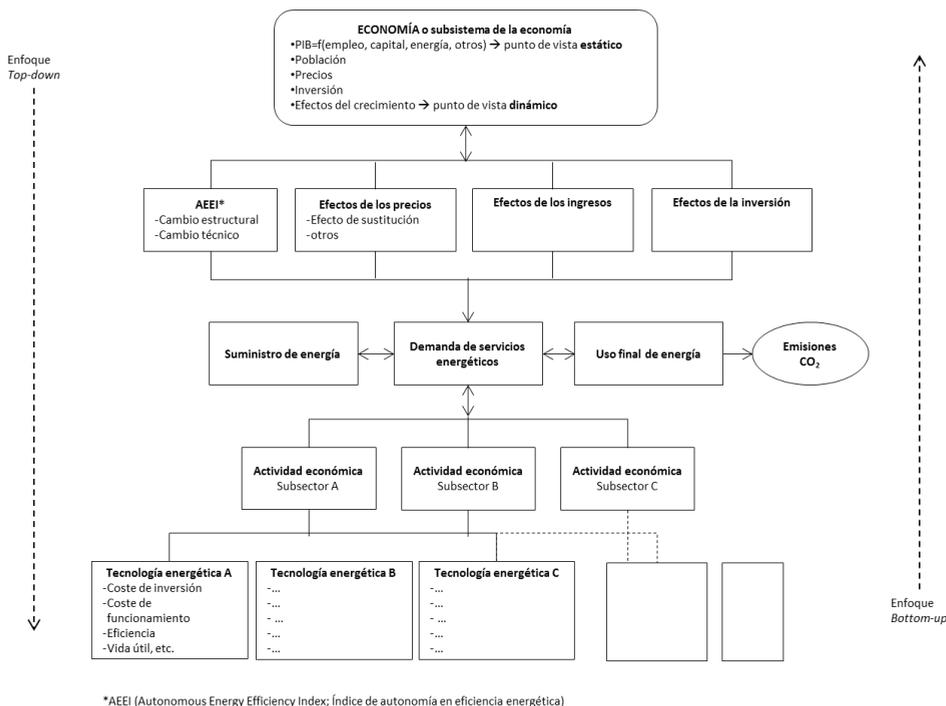


Figura 2.4 Enfoques de modelización *top-down* y *bottom-up* (adaptado de Kavgić et al. (2010))

Aunque ambos enfoques son válidos y aplicables para llevar a cabo la evaluación energética de un conjunto de edificios, las fortalezas y debilidades de cada uno de ellos descritas anteriormente se resumen en la Tabla 2.3, con el fin de servir de guía rápida a la hora de decantarse por uno de ellos.

Tabla 2.3 Fortalezas y debilidades de los enfoques *top-down* y *bottom-up* (adaptado de Swan y Ugursal (2009))

	<i>Top-down</i>	<i>Bottom-up</i>	
		Estadístico	De ingeniería
Fortalezas	<ul style="list-style-type: none"> • Predicción a largo plazo en ausencia de discontinuidades • Incorporación de efectos macroeconómicos y socioeconómicos • Información de partida relativamente simple con disponibilidad • Engloba tendencias 	<ul style="list-style-type: none"> • Incorpora el comportamiento de los ocupantes • Incorporación de efectos macroeconómicos y socioeconómicos • Determina usos finales energéticos típicos • Utiliza datos de facturas y de encuestas 	<ul style="list-style-type: none"> • Permite modelar nuevas tecnologías y determinar su impacto • Estimación energética “desde cero” • Determinación de cada uso final de energía por tipo, ratio, etc. • Determinación de los usos finales basado en la simulación
Debilidades	<ul style="list-style-type: none"> • Confía en históricos de consumo • No explicita los usos finales • Análisis basto • No apto para formular políticas energéticas 	<ul style="list-style-type: none"> • Confía en históricos de consumo • Multicolinealidad de variables • Requiere de exhaustividad de la muestra para explotar la variedad 	<ul style="list-style-type: none"> • Asunción de comportamiento de ocupantes incierto • Información de entrada muy detallada • Intensidad computacional y tiempo requerido • No considera factores económicos

2.4.2 METODOLOGÍAS EXISTENTES DE EVALUACIÓN ENERGÉTICA DEL PARQUE EDIFICATORIO

En las últimas décadas, diversos autores han desarrollado métodos enfocados a evaluar energéticamente el parque edificado, tanto desde la perspectiva *bottom-up* como desde la *top-down*. A continuación, se presenta una revisión de las mismas, clasificadas por su aplicación a nivel internacional y nacional.

2.4.2.1 Revisión de metodologías a nivel internacional

Los primeros esfuerzos dirigidos a evaluar el comportamiento energético del parque edificado se remontan a 1998 en Canadá (Farahbakhsh et al., 1998), lo que denota una tardía toma de conciencia en relación al impacto ambiental que tiene el comportamiento energético de los edificios. Sin embargo, durante un periodo de tiempo relativamente corto referido hasta la actualidad, se observan ya diversas metodologías surgidas en muchos países de los continentes de América, Europa y Oceanía.

Como se observará a continuación, cabe destacar que la mayoría de metodologías proponen, en una fase previa a la evaluación energética, una clasificación del parque edificado que permita caracterizar y estandarizar las tipologías edificatorias con el fin de simplificar el proceso de evaluación energética.

A continuación se describe, para cada país, las iniciativas surgidas relativas a la evaluación del comportamiento energético del parque edificado, que se clasifican en función de su año, enfoque, región, escala, sector, metodología seguida y otros aspectos, según se muestra en la Tabla 2.4.

Canadá

En Canadá destaca la metodología CREEM (*The Canadian Residential Energy End-use Model*) empleada por Farahbakhsh et al. (1998), que diferencia cuatro franjas temporales (pre 1941, 1941-1966, 1967-1978, post-1978) y cinco tipologías edificatorias: unifamiliar aislado, unifamiliar pareado, edificios de menos de cinco plantas, edificios de más de cinco plantas y casas móviles, todos ellos incluidos dentro del sector residencial. Con el modelo, se pretende investigar el impacto de varias estrategias para la reducción de las emisiones de CO₂ en base a dos diferentes escenarios según dos normativas del país. La limitación del modelo reside en que no están recogidas todas las tipologías que representan el parque de edificios existente en Canadá y en que los edificios antiguos construidos previamente a las normativas tampoco son contemplados.

Estados Unidos

En Estados Unidos, Huang y Berkeley (2000) proponen un modelo para analizar las cargas térmicas de calefacción refrigeración asociadas a los elementos de la envolvente térmica (ventanas, cubiertas, fachadas, instalaciones de acondicionamiento, etc.). En él se analizan edificios construidos en diferentes periodos temporales y se tiene en cuenta tanto el sector residencial como el comercial. En el sector residencial se discierne entre las viviendas unifamiliares y diferentes tamaños de edificios en función del número de viviendas. A posteriori, para realizar la evaluación energética, se tiene en cuenta el tipo de suministro de energía y se evalúa el potencial de medidas de conservación energética. Sin embargo, el modelo no proporciona una información clara sobre en qué parte del parque edificado dichas medidas son más efectivas o beneficiosas.

Estiri (2014) selecciona un conjunto de variables (ingresos, tamaño de vivienda, estado civil de los ocupantes, número de adultos, tipología de edificio, número de espacios y tamaño) y analiza su influencia en el consumo energético de los edificios residenciales a través de un modelo estadístico.

Brasil

Con un enfoque puramente urbano, Martins et al. (2014) analizan los condicionantes del urbanismo para identificar las oportunidades de diseño de las tipologías edificatorias. La metodología se desarrolla para el ámbito de Brasil y expone un caso de estudio en la ciudad de Maceió. El estudio analiza un doble reto: el potencial para aprovechar la energía solar como fuente de energía renovable para producción de electricidad y la demanda energética debida a las ganancias solares indeseadas en los edificios. Los programas utilizados para realizar el estudio son RADIANCE y modeFRONTIER, aunque estos se combinan con Matlab y un análisis estadístico para extraer resultados. Además, la metodología utiliza tecnología SIG para representar los resultados a escala urbana.

Australia

En Australia, Ren et al. (2012) desarrollan un modelo *bottom-up* físico para estimar el consumo anual del parque de viviendas a nivel de local (según el *Census Collection District-CCD*) con una resolución de cada hora, para posteriormente extrapolarlo a nivel nacional. Realizando simulaciones considerando las características constructivas y los materiales, el equipamiento, las zonas climáticas y los patrones de ocupación, se consigue obtener el consumo total de energía, incluyendo diferentes usos: calefacción y refrigeración, agua caliente sanitaria, iluminación y otros aparatos de uso doméstico. Los resultados se centran en el consumo de electricidad, ya que con respecto al gas natural y otros combustibles no se dispone de datos. Se diferencian cuatro tipologías edificatorias (vivienda unifamiliar aislada, vivienda unifamiliar pareada, edificio de viviendas de hasta 2 plantas, edificio de viviendas de más de 2 plantas), para las que se adopta una superficie media construida, según las estadísticas del país. Se tienen además en cuenta diferentes perfiles de ocupación en las viviendas, que permiten hacer estimaciones del consumo energético en diferentes periodos del día.

Finlandia

En el caso de Finlandia, el modelo propuesto por Snäkin (2000) fue uno de los pioneros y fue desarrollado como herramienta de ayuda a la toma de decisiones para las autoridades locales, en relación a aspectos energéticos, ambientales y también del coste de la energía. Los usos considerados abarcan desde el residencial, comercial, educativo, oficinas, etc., hasta el industrial. En cuanto al uso residencial, los edificios son diferenciados en viviendas aisladas, viviendas pareadas y edificios de viviendas. Se tiene también en cuenta el año de construcción del edificio con la diferenciación de siete periodos temporales (pre-1920, 1921-1939, 1940-1959, 1960-1969, 1970-1979, 1980-1989, post-1990). Además, por las características climáticas del país, en la metodología se incluyen aspectos no considerados en otros modelos, como son el tipo de calefacción utilizada y el tipo de suministro de energía.

Reino unido

En el Reino Unido existen siete modelos para evaluar el parque residencial de viviendas existente y predecir su comportamiento en escenarios futuros; todos ellos basados en un enfoque *bottom-up* físico, a través de la simulación con programa informático y métodos empíricos. El primero de ellos, BREHOMES (*a physically-based model of the energy use of the housing stock*), surgió a principios de los años 90 y fue desarrollado por Shorrock y Dunster (1997), que incorpora 1000 categorías de viviendas para definir el parque existente y diferentes patrones de uso de la calefacción. El modelo plantea dos escenarios, denominados de referencia y eficiente, aportando el coste de las medidas de conservación energética.

En 2003, Johnston et al. (2005) plantean otro modelo para predecir el comportamiento energético de los edificios del Reino Unido en 2050 en base al año 1996, y para ello propone tres escenarios: situación actual de referencia (*business as usual*), escenario asumiendo las exigencias normativas (*demand side*) y escenario integrado considerando además el suministro energético (*integrated*). La metodología divide el parque de edificios en dos franjas temporales (pre 1996 y post 1996) coincidiendo con la normativa de edificación. El primero de ellos, escenario *business as usual*, representa el caso base o de referencia en el que se considera que no se darán cambios sustanciales en las tendencias futuras de las políticas de eficiencia energética y que existe abundancia en los recursos energéticos, aspectos que conllevan un aumento en el consumo de energía, la reducción de los precios y, además, limitación en las posibilidades de inversión en medidas de eficiencia energética. En el segundo de los escenarios, *demand side*, se toma conciencia sobre los efectos evidentes del cambio climático, por lo que se encaminan esfuerzos hacia objetivos más estrictos en la reducción de emisiones de carbono a través de soluciones técnicas para aumentar la eficiencia energética. Sin embargo, no se consideran cambios en las formas de suministro de energía más allá de las identificadas en el escenario *business as usual*. El tercer y último de los escenarios, *integrated*, aglutina tanto cambios en la forma de suministro de energía como en mejoras sustanciales de eficiencia energética. Este describe un futuro dramático en cuanto al impacto negativo sobre el cambio climático, por lo que tiene en cuenta importantes reducciones en las emisiones de gases de efecto invernadero para acometer los objetivos a largo plazo para el año 2050. Ello además conduce a la generalización de las energías renovables y a la utilización de nuevas tecnologías avanzadas.

Boardman (2007) propone el modelo UKDCM (*UK Domestic Carbon Model*) a través del *40% house escenario*, que define una estrategia en Reino Unido para conseguir reducir el 60% de las emisiones en el sector residencial antes de 2050). En este modelo se utiliza una clasificación muy desagregada a nivel nacional, basada en el año de construcción, la tipología edificatoria, la tipología constructiva, el número de plantas y la superficie construida.

En el mismo año, Natarajan y Levermore (2007) plantea el modelo DECarb (*future climate data and current housing stock data for the UK*) con un total de 8064 combinaciones entre distintas variables: seis periodos de construcción y otras variables como la tipología edificatoria, características constructivas y de aislamiento térmico, etc.

En el modelo CDEM (*Community Domestic Energy Model*) planteado por Firth et al. (2010) se proponen 47 arquetipos según el año de construcción y la morfología y tipología edificatoria.

Todos ellos están basados en un enfoque *bottom-up* físico y emplean la herramienta BREDEM (BRE, 2005) para modelar los edificios, que requiere los siguientes datos de entrada: elementos y características de la envolvente térmica, sistema de calefacción, temperaturas interiores y exteriores, patrones de uso de la calefacción, número de ocupantes y ganancias solares.

Posteriormente en el año 2011, Cheng y Steemers (2011) analizan las debilidades de los modelos anteriores destacando la falta de transparencia y cuantificación de las incertidumbres en los datos de entrada en los modelos para obtener predicciones fiables, y cuestiona su aplicabilidad en las políticas energéticas para la toma de decisiones. Como mayor deficiencia en los modelos, nombran la generalización en los patrones de ocupación y el comportamiento de los ocupantes de las viviendas, que pueden llegar a tener una influencia decisiva en la determinación de los consumos y emisiones de CO₂. Así pues, proponen el modelo DECM (*Domestic Energy and Carbon Model*) en el que se establece una relación entre los patrones de comportamiento de los ocupantes y su estatus socio-económico, definiendo cuatro patrones de comportamiento de los ocupantes (en días laborables y fines de semana). Además, este trabajo aporta un análisis de sensibilidad para estudiar cómo varían los resultados del modelo al variar los datos de entrada, lo que permite examinar la importancia relativa de los diferentes parámetros tenidos en cuenta en el modelo.

Por último, en Reino Unido, Jones et al. (2007) critican la carencia de modelos que abarquen la escala urbana y proponen un modelo para estimar el comportamiento energético del entorno construido, llamado EEP (*Energy and Environment Prediction*). Este incorpora el uso de energía en los edificios, pero también el flujo de transporte y la salud pública.

Bélgica

En Bélgica, el modelo propuesto por Hens et al. (2001) para el sector residencial clasifica al parque existente de viviendas por año de construcción (pre-1945, 1946-1979, 1971-1980, 1981-1990), por tipología edificatoria (viviendas en hilera, viviendas pareadas y edificios de viviendas), por superficie construida (hasta 64 m², de 65 hasta 104 m² y más de 105 m²), por el tipo de energía primaria (electricidad, butano, gas, petróleo, otros) y por la presencia o no de calefacción central. La propuesta únicamente tiene en cuenta las instalaciones de calefacción central y el suministro energético, dejando de lado las posibles instalaciones de refrigeración, iluminación y el equipamiento en las viviendas, como ocurre en la mayoría de los modelos propuestos. Cabe destacar que este modelo otorga toda la importancia a las instalaciones del edificio, no haciendo hincapié en las características constructivas de la envolvente. Con el modelo se demuestra que las políticas focalizadas en los nuevos edificios y la rehabilitación de los existentes no están siendo suficientes para alcanzar los objetivos de reducción de emisiones y por ello, se requieren mayores esfuerzos.

Grecia

En Grecia se ha publicado numerosa bibliografía que recoge distintos sistemas de caracterización de los edificios existentes. Entre los sistemas implementados, destaca el elaborado por Theodoridou et al. (2011a) que clasifica el parque edificado griego, dividiendo el país en cuatro zonas climáticas de acuerdo con la normativa estatal y agrupando los edificios en función de su año de construcción (1919-1945, 1946-1980, 1981-1990, 1991-2010, octubre 2010 hasta la actualidad), su uso y tipología, el número de plantas y los materiales constructivos. Además, se tienen en cuenta aspectos socioeconómicos e históricos, que ejercen una influencia relevante en las características constructivas de los edificios. Teniendo en cuenta lo anterior, se extraen cinco clases de edificios para ser evaluados a través de simulaciones con la herramienta EnergyPlus con información de entrada basada en las especificaciones de la normativa nacional sobre eficiencia energética de edificios y que, posteriormente, constituyen una base de datos que sirve para analizar el comportamiento energético de los edificios griegos a escala nacional.

Aspectos intrínsecos de los edificios y la relación de dependencia con el consumo energético son estudiados por Theodoridou et al. (2011b) a través de un análisis estadístico llevado a cabo con la herramienta SPSS. Las conclusiones que se extraen son que el consumo energético de los edificios residenciales aumenta a medida que el año de construcción decrece (mayor antigüedad de los edificios) y que este también se incrementa a mayor número de ocupantes o superficie construida. Por otro lado, se concluye que los acristalamientos simples en huecos perjudican el consumo energético, así como aquellos elementos de la envolvente térmica que no poseen aislamiento térmico. Además, en el trabajo se tratan aspectos sociales, demostrando que a mayores ingresos en la unidad familiar se produce un mayor consumo energético en la vivienda. Los datos son extraídos mediante encuestas enviadas electrónicamente a los usuarios de las viviendas y entrevistas realizadas puerta a puerta, para conocer aspectos como son la tipología edificatoria y estructural, el sistema de calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria, si se han efectuado obras de reforma en las viviendas, etc. Todos estos datos posteriormente son procesados para extraer las conclusiones comentadas.

En sucesivos estudios de los mismos autores, dicha categorización del parque existente sirve como punto de partida para crear un SIG mediante la herramienta ArcGIS, centrándose en tres tipologías principales de edificios (aislado, medianero en una de sus caras y medianero en hilera). La herramienta SIG permite tratar aspectos como el potencial para la instalación de sistemas de energías renovables, calcular el potencial para la instalación de sistemas solares en las cubiertas según la superficie disponible, la posibilidad de implementar cubiertas vegetales y otros aspectos como la orientación o las sombras. Además, se hace especial hincapié en el factor de forma del edificio, que se identifica por los autores como el mejor indicador para correlacionar la estructura y forma de un edificio con su perfil de comportamiento energético Theodoridou et al. (2012). Para validar la metodología propuesta, ésta se aplica a un caso de estudio a escala de ciudad, en dos municipios griegos: Thessaloniki (17.949 edificios) y Kalamaria (5.987 edificios).

Desde el enfoque *top-down*, Balaras et al. (2007) proponen una clasificación más genérica, dividiendo el parque edificatorio griego en tres franjas temporales (anterior a 1980, 1981-2001, 2002-2010) y diferenciando entre dos tipologías edificatorias: vivienda individual y edificio de viviendas, en cada una de las cuatro zonas climáticas presentes en el país. Esta clasificación que da como resultado un total de 24 categorías de edificios en base a los anteriores tres criterios: año, tipología y zona climática. En este trabajo se presenta un paquete de medidas de ahorro energético (ECM, energy conservation measures) según un orden de prioridad, así como el establecimiento del potencial de ahorro de energía y el coste económico de las mismas.

También basado en la clasificación anterior, se encuentra el trabajo desarrollado por Dascalaki et al. (2011) que emplea la clasificación en las mismas 24 tipologías de edificios para estimar el consumo de energía térmica y las emisiones de CO₂ asociadas a los edificios a escala nacional. Con ello se demuestra que las tipologías edificatorias suponen un modelo sólido para predecir el consumo energético del parque residencial de edificios de un país.

Italia

En Italia se ha desarrollado numerosa bibliografía basada en diversas metodologías. Una de las más significativas es la propuesta elaborada por Dall'O' et al. (2012), que se basa en un enfoque *bottom-up* estadístico y empírico (de ingeniería) en un entorno SIG. La metodología parte de la recabación de documentación (planos, información catastral, plano de situación, datos del edificio, etc.) para su posterior inserción en una plataforma SIG. A partir de datos del censo estadístico de edificios, se toman como muestra ciertos edificios representativos que serán posteriormente evaluados energéticamente para determinar su calificación. Mediante el tratamiento de los datos en SIG, se obtiene finalmente una base de datos que permite a las autoridades locales estimar el nivel de calificación energética de los edificios de todo un municipio, en base a unas variables previamente definidas. Los autores apuntan que, demasiada información introducida en el SIG puede sobrecargar la base de datos y complicar enormemente el estudio y la inspección de los edificios que se tomarán como muestra. Por ello, recomiendan establecer un número limitado de variables para caracterizar los edificios individualmente, variables que se introducirán a posteriori en la base de datos SIG, y que son las siguientes: zona climática, aspectos geométricos (factor de forma del edificio (S/V), superficie transparente/superficie opaca), características constructivas de la envolvente térmica (transmitancia térmica de huecos y opacos), tipo de regulación en planta (centralizada, local, etc.), uso (residencial, comercial, etc.). La base de datos se compone de determinados valores a partir de los cuales se calcularán las variables anteriores (superficie, altura del edificio, número de plantas, volumen, superficie de huecos, etc.). Con dicha información, la metodología permite estimar la calificación energética de los edificios de un municipio, y por tanto su consumo de energía asociada y emisiones de CO₂.

Otra de las aportaciones interesantes de este trabajo es la introducción de un indicador para estimar el nivel de eficiencia energética de los edificios (calificación energética) a través de rectas de regresión basadas en la correlación entre el consumo de energía y el factor de forma del edificio (S/V), durante los diferentes periodos de construcción. Así pues, se demuestra que los edificios con menores S/V se comportan mejor y que la eficiencia energética de los edificios ha tendido a aumentar con el paso de los años.

Otros autores, como Caputo et al. (2013), realizan un planteamiento similar, llevando a cabo la caracterización de los edificios y el tratamiento de los datos en SIG. Definen cuatro arquetipos (según su tamaño, número de plantas, factor de forma) e identifican siete periodos de construcción (pre-1919, 191-1945, 1946-1960, 1961-1971, 1972-1981, 1982-1991, post-1991), que sirven tanto para edificios residenciales como comerciales. Aplicando esta metodología en la ciudad de Milán, consiguen estimar el consumo de energía final para calefacción, para iluminación y equipamiento, para agua caliente sanitaria y para instalaciones de cocina. Sin embargo, dejan de lado la estimación del consumo asociado a la refrigeración, que en determinados periodos estivales puede llegar a aumentar notablemente el consumo energético de las viviendas. Se destaca en este trabajo, la importante labor que ejercen herramientas accesibles como son *Google Earth*, *Street View* y las bases estadísticas del censo de los municipios proporcionadas por las oficinas del catastro.

También empleando la plataforma SIG, Ascione et al. (2013) desarrollan una metodología analítica para caracterizar el comportamiento energético de edificios nuevos y existentes para verano e invierno, aplicada a escala urbana. La clasificación de los edificios se realiza teniendo en cuenta el año de construcción, el número de plantas, el número de viviendas que compone el edificio, la existencia o no de edificios continuos, la orientación, la habitabilidad y las sombras. A diferencia de otros trabajos, los autores otorgan importancia a los puentes térmicos y para tenerlos en cuenta aplican un porcentaje de aumento de la transmitancia térmica en los elementos de la envolvente, en función de las características constructivas. También tienen en cuenta para la evaluación energética la irradiancia solar sobre las superficies verticales de los edificios. Para modelar el comportamiento energético de los edificios, estos autores realizan simulaciones dinámicas empleando DesignBuilder como interfaz del programa EnergyPlus y determinan la calificación energética de los edificios con el programa nacionalmente reconocido. Con los datos introducidos en SIG, confeccionan mapas urbanos energéticos (*urban energy maps*) para evaluar el parque de edificios a escala urbana, aportando un caso de aplicación en un barrio de la ciudad de Benevento.

Por otro lado, la tradición en la conservación del patrimonio histórico en Italia, no puede obviar su adaptación a los requerimientos energéticos de las nuevas directivas. En su trabajo, Fabbri et al. (2012) centra sus esfuerzos en evaluar los edificios históricos con el objetivo de determinar el grado de tolerancia en la actuación de los mismos, para mejorar su comportamiento energético. Así pues, en su propuesta los autores engloban los edificios de todo tipo de usos (residenciales, oficinas, sanitario, educativo, etc.) construidos en tres franjas temporales (preindustriales 1945, 1946-1991, 1991-2001) según criterios históricos y normativos. A través del tratamiento de la información catastral disponible en SIG y el desarrollo de un indicador energético de zona (consumo de energía/número de unidades urbanas), se consigue cuantificar y evaluar el comportamiento energético de toda la ciudad o bien de una zona determinada.

Mauro et al. (2015) proponen un modelo, llamado SLABE (*Simulation-based Large-scale uncertainty/sensitivity Analysis of Building Energy performance*), para estimar medidas costo-efectivas para rehabilitar los edificios, centrándose en una tipología muy concreta: los edificios con una geometría rectangular. Para realizar las simulaciones se emplean los programas EnergyPlus y Matlab, a partir de los cuales se determina la demanda energética, horas de desconfort, costes y efectividad de la implementación de medidas de eficiencia energética. Planteada la metodología, ésta se aplica a los edificios de oficinas del sur de Italia.

Portugal

Entre las aportaciones desarrolladas en Portugal, destaca el trabajo realizado por Gouveia et al. (2012), donde se identifican los parámetros más influyentes en la demanda energética de los edificios residenciales a través de un análisis de sensibilidad, para predecir el escenario en el año 2050. Se emplea el modelo TIMES (*The Integrated MARKAL-EFOM System*) para evaluar las opciones tecnológicas y la variación de parámetros para cada uso final de energía, en seis usos diferenciados: calefacción y refrigeración de espacios, agua caliente sanitaria, equipamiento en cocina, refrigeración y aparatos de limpieza (lavadoras, secadoras y lavavajillas), iluminación y otros. El objetivo final es poder determinar en qué usos finales y en qué parámetros en particular, deben centrarse las políticas energéticas para alcanzar los objetivos de reducción de consumo. El parque de edificios portugués se estructura en cuatro tipologías edificatorias, distribuidas en dos zonas climáticas: vivienda unifamiliar y edificio de viviendas en el sur del país, y vivienda unifamiliar y edificio de viviendas en el norte. Además, se diferencian tres periodos temporales (pre 1900, 1990-2005 y post 2005) y se identifican las características constructivas de la envolvente térmica (aislamiento, porcentaje de acristalamiento y factor solar).

Francia

Desde un enfoque *top-down*, Salat (2009) cuantifica las cargas energéticas y las emisiones de CO₂ del parque de edificios de París en base a la morfología urbana, tipologías edificatorias, sistemas energéticos y comportamiento de los usuarios. En su estudio, la selección de variables es interesante y todas son susceptibles de afectar al comportamiento energético de los edificios. Sin embargo, la opacidad de la metodología hace difícil identificar la procedencia de los datos y no permite identificar cómo afectan dichas variables de una manera objetiva.

Florio y Teissier (2015) realizan una estimación de los certificados de eficiencia energética de un parque de viviendas, caracterizado a través de variables cualitativas que definen la tipología de las viviendas. Los autores proponen la metodología como una herramienta para evaluar la pobreza energética. La clasificación de las viviendas se lleva a cabo en el marco del proyecto europeo EIE TABULA (2009-2013) (Loga et al., 2012), desarrollado por trece países en el marco de *Intelligent Energy Europe* (European Project Partners, 2012). El objetivo del trabajo es asignar una calificación energética de la A a la G a cada tipología, en base a su energía primaria asociada a la calefacción, al agua caliente sanitaria y a la ventilación.

Suiza

Fonseca y Schlueter (2015) presentan un modelo integrado para la caracterización espacio-temporal de los patrones de consumo energético de los edificios residenciales, industriales y administrativos, a escala de barrio y de ciudad, utilizando un entorno SIG. Los datos de entrada en el modelo se componen de diversas bases de datos: climática, urbana en SIG, de arquetipos de edificios y de mediciones basadas en datos disponibles. A través de un modelo estadístico, los autores relacionan los consumos anuales de energía con edificios mediante unas ecuaciones matemáticas. A continuación, a través de un modelo analítico, determinan hora a hora las necesidades de electricidad, agua caliente sanitaria y climatización. Con ello, determinan de una forma muy detallada las cargas necesarias para satisfacer las necesidades energéticas en los edificios. Una vez analizados los arquetipos de forma individual, los resultados se agregan a una escala mayor a través de la estadística, lo que apoyado en la herramienta SIG, permite representar los resultados a escala urbana. El estudio permite analizar el potencial de la rehabilitación de edificios mediante la suposición de varios casos. Finalmente el método es validado mediante el programa EnergyPlus.

Suecia

En Suecia, destaca el modelo propuesto por Mata et al. (2013), denominado ECCABS (*Energy, Carbon and Cost Assessment for Building Stocks*), mediante el cual se modela el uso de la energía, las emisiones de CO₂ y los costes de la implementación de 12 medidas de eficiencia energética para la rehabilitación de edificios. El enfoque *bottom-up* permite estimar dichos parámetros para la totalidad del parque residencial de edificios sueco y evaluar los efectos de las medidas de ahorro de energía. Los autores concluyen que la implementación de las medidas puede llegar a reducir el 55% de la energía y el 63% de las emisiones de CO₂. Las herramientas utilizadas para desarrollar el modelo son Matlab y Simulink.

Alemania

McKenna et al. (2013) analizan el potencial de desarrollo del parque residencial alemán y la capacidad para acometer los objetivos de política energética, estudiando escenarios temporales entre 2010 y 2050. El método empleado se basa en un enfoque *bottom-up* y utiliza proyecciones de futuro de la demanda energética por superficie y ratios de construcción/demolición dinámicos en el tiempo. Por un lado, propone un modelo para caracterizar los edificios residenciales basado en el año de construcción (pre 1918, 1919-1948, 1949-1957, 1958-1968, 1969-1978, 1979-1983, 1984-1990, 1991-1995, 1996-2000, 2001-2010) y la tipología constructiva (viviendas unifamiliares aisladas, viviendas unifamiliares pareadas, pequeños edificios de viviendas, grandes edificios de viviendas, edificios de gran altura). Con ello, propone una expresión para estimar el tamaño, en términos de superficie, del parque de edificios en el futuro, teniendo en cuenta las ratios de construcción y demolición. Por otro lado, propone un modelo para estimar la demanda energética del parque en los escenarios futuros planteados hasta el año 2050, tanto para edificios nuevos como existentes. Para ello, plantea tres niveles de rehabilitación de los edificios, de acuerdo con la normativa nacional vigente. Para ilustrar la variabilidad de los datos de entrada en el modelo, se efectúa un análisis de sensibilidad en el que se demuestran los efectos de variación de los parámetros. Finalmente, los autores concluyen que el modelo llega a obtener resultados muy similares a otros modelos propuestos en Alemania, pero más austeros, debido a la consideración de mayor número de parámetros y su variación en el tiempo (en base a procedimientos dinámicos, no estacionarios).

Eslovenia

Košir et al. (2014) analizan siete configuraciones urbanas con diferentes tipologías de edificios para estudiar el potencial solar del urbanismo, especialmente para la rehabilitación de los mismos. Los cálculos se realizan con el programa SHADING y los resultados revelan que las configuraciones urbanas existentes no son tan problemáticas como las tipologías y la orientación de los edificios, que presentan un reto mayor.

Nivel europeo

Más ambicioso es el estudio propuesto por Uihlein y Eder (2010), que analizan el potencial de las políticas de la Unión Europea para mejorar la eficiencia de los edificios residenciales con respecto a la demanda energética, las emisiones de GEI y los costes asociados, a escala europea. Los autores pretenden demostrar cómo la renovación de elementos menores del edificio con baja eficiencia (cubiertas y ventanas) puede ser muy significativa, en contraste a las recientes directrices de la Unión Europea centradas principalmente en los edificios de nueva planta y en aquellos existentes sujetos a grandes reformas integrales. En este estudio, el parque de edificios residencial de 27 países de la Unión Europea queda dividido en seis clases de edificios: tres tipologías edificatorias (viviendas

unifamiliares, edificios de viviendas, edificios de viviendas de gran altura) diferenciadas cada una de ellas entre edificios existentes y nuevos. Con los datos de las superficies construidas se analiza el comportamiento del parque edificado construido entre 1900 y 2006 para predecir posteriormente el impacto ambiental y económico hasta el año 2060. Para ello, se diferencian tres grandes zonas climáticas en Europa (norte, centro y sur) y cuatro niveles de eficiencia energética en función del grado de rehabilitación prevista para los edificios.

2.4.2.2 Revisión de metodologías a nivel nacional

A nivel nacional, la bibliografía no es muy extensa en lo que se refiere a la evaluación del parque existente de edificios. Además, la variabilidad entre las diferentes zonas de España es muy amplia, debido al gran abanico de zonas climáticas que encontramos y a razones que atienden a aspectos socio-económicos e históricos. La forma de construir entre el norte y el sur del país presenta diferencias notables y por ello, es difícil establecer una metodología que se adapte y que reúna todas las características del parque edificado para representarlo de forma fidedigna.

Probablemente, por este motivo, la bibliografía existente se centra en el estudio de una región determinada del país, más concretamente de una Comunidad Autónoma, lo que permite acotar a un menor rango las zonas climáticas y realizar una clasificación de los edificios más ajustada a cada realidad.

País Vasco

En el País Vasco, Terés-Zubiaga et al. (2013) proponen una metodología para la ciudad de Bilbao con el objetivo de medir el comportamiento energético de las viviendas sociales a través de la selección, estudio y monitorización de diez viviendas representativas del municipio. Según los autores, los resultados podrían ser extrapolables no sólo al municipio de Bilbao sino al resto de la región del País Vasco. Los autores señalan que la vivienda social es uno de los sectores con mayor riesgo de pobreza energética y de ahí la importancia de actuar en su rehabilitación, especialmente en aquellas viviendas construidas anteriormente al año 1980, previamente a la legislación en materia de condiciones térmicas, Norma Básica de la Edificación de Condiciones Térmicas en los Edificios (NBE-CT-79, 1979). Para efectuar la caracterización de los edificios, previamente realizan un análisis histórico de los acontecimientos más importantes y de la normativa, con lo que extraen cinco periodos temporales (1900-1939, 1939-1957, 1957-1980, 1980-2006, post-2006). Para cada uno de estos periodos se seleccionan dos edificios representativos y se describen sus características: edad y número de los ocupantes, periodo de ocupación, transmitancias térmicas de los elementos de envolvente térmica, superficie y suministro de energía.

La originalidad del estudio radica en la monitorización de las viviendas estudiadas para determinar los consumos reales, a través de ciertos parámetros: humedad y temperatura interior, facturas energéticas y mediciones reales de consumos (en cinco periodos estacionales clave), estudios termográficos y cuestionarios realizados a los ocupantes.

El estudio pone especial atención a la influencia del comportamiento de los ocupantes en el consumo energético de las viviendas, que se evalúa a través de cuestionarios para conocer los hábitos de los usuarios.

Cataluña

De forma similar ocurre en Cataluña, donde Garrido-Soriano et al. (2012) proponen una caracterización del parque existente basada en trece tipologías de edificios, en las cuatro zonas climáticas presentes en la región, la tipología edificatoria y las características constructivas de la

envolvente térmica. A su vez se proponen cuatro franjas temporales: pre-1940, 1940-1980, 1980-1990 (post NBE CT-79), 1990-2001 (post NRE-AT-87, legislación regional en Cataluña). Como citan los autores, el 60% de las viviendas en Cataluña fueron construidas en el periodo 1940-1980, previamente a la entrada en vigor de la NBE-CT-79. Una vez realizada la caracterización del parque edificatorio en Cataluña, se realiza una estimación de la demanda energética, del consumo energético y de las emisiones de CO₂ hasta el año 2005 (justo antes de la entrada en vigor del CTE), para posteriormente predecir el escenario en el año 2015. Para ello, se hace una estimación del número de edificios en cada una de las categorías para el año 2015 y se determinan mediante simulación con las herramientas LIDER y CALENER VvP el consumo energético y las emisiones de CO₂ (en los supuestos de rehabilitar el 2% del parque y el 100%). Además, se calcula el impacto económico que supondría la rehabilitación de los edificios para alcanzar dichas reducciones.

Comunidad Valenciana

En el contexto de la Comunidad Valenciana, el Instituto Valenciano de la Edificación participa en el marco del proyecto europeo EIE TABULA (2009-2013) (Loga et al., 2012), integrando a España como país asociado. Este proyecto propone un marco armonizado común para comparar los parques de edificios residenciales de los diferentes países europeos que se integran como socios, en relación a su eficiencia energética. Cada tipología nacional de edificios se clasifica según su tamaño, antigüedad, zona climática e instalaciones, de manera que se obtiene para cada país un conjunto de edificios que representan todo el parque de edificios existente, con un ejemplo de cada tipología. Cada uno de los socios participantes en el proyecto ha realizado dicha clasificación, aportando un folleto de tipologías de edificios. La herramienta Web TABULA (EIE TABULA Intelligent Energy, 2012) proporciona un cálculo online de los edificios ejemplo de todos los países participantes, mostrando sus características energéticas y los posibles ahorros que se pueden lograr mediante la aplicación de medidas de rehabilitación energética (medidas estándar y medidas avanzadas), aportando datos sobre demanda, consumo, energía primaria, emisiones de CO₂ y costes.

En su informe de resultados, el Instituto Valenciano de la Edificación propone una clasificación en las siguientes tipologías de edificios: vivienda unifamiliar aislada, vivienda adosada entre medianeras, edificios plurifamiliares entre medianeras, bloque de apartamentos aislado. Por otro lado, se consideran tres zonas climáticas y seis periodos temporales (pre-1900; 1901-1936; 1937-1955; 1956-1979; 1980-2006), con lo que surge una matriz con 72 tipologías edificatorias que caracteriza el parque residencial del Estado Español (Instituto Valenciano de la Edificación, 2014).

Como continuidad a este proyecto, se está desarrollando actualmente una línea de investigación para monitorizar los edificios y conocer el consumo energético real de los mismos, a través del proyecto europeo EPISCOPE (Diefenbach et al., 2014).

2.4.2.3 Síntesis de las metodologías revisadas

Las principales características de los modelos revisados se sintetizan en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Revisión de metodologías para la evaluación energética del parque edificado

Referencia	Año	Enfoque	Región	Escala	Sector	Metodología	Sistemas de cálculo	Método predicción	Variables energéticas relacionadas	SIG	Caso de aplicación
Farahbaksh et al. (1998)	1998	B	Canadá	N	Residencial	CREEM	HOT 2000	^(a) SREU	Consumo energético; emisiones CO ₂ ; MEE	N/A	Canadá
Huang y Berkeley (2000)	2000	B	US	N	Residencial; comercial	Huang and Brodick	DOE-2.1E	⁽¹⁾ Extrapolación	Cargas energéticas (calefacción, refrigeración)	N/A	US
Estiri (2014)	2013	T	US	N	Residencial	Modelo	Análisis estadístico (USREL 8.8 y PRELIS 2.8 software)	^(a) RECS	Influencia de diversos factores de viviendas en el consumo energético	N/A	N/A
Martins et al. (2014)	2013	B	Brasil	N; R	Todos	Metodología	modeFRONTIER, Matlab, RADIANCE softwares; análisis estadístico	^(a) Algoritmo	Potencial de irradiación solar en fachadas y cubiertas	SIG	Ciudad de Maceió
Ren et al. (2012)	2012	B	Australia	C	Residencial	Modelo	AusZEH tool	⁽¹⁾ Extrapolación	Consumo energético	N/A	18 ciudades en distintas zonas clim.
Uihleiny Eder (2010)	2009	T	EU	EU	Residencial	No definido	Datos de estadísticas nacionales y Eurostat	^(a) IMPRO-Building report	Demanda energética; emisiones CO ₂ ; coste de MEE	N/A	EU
Shakin (2000)	1999	B	Finlandia	R	Todos	Modelo	Análisis de datos estadísticos de diferentes fuentes	^(a) Extrapolación	Demanda energética (calefacción); emisiones CO ₂	N/A	Provincia de North Karelia
Shorrock y Dunster (1997)	1990	B	UK	N	Residencial	BREHOMES	BREDEM	^(a) DECADE database	Consumo energético; emisiones CO ₂ ; costes	N/A	UK
Johnston et al. (2005)	2005	B	UK	N	Residencial	Modelo	BREDEM	^(a) DECADE database	Demanda energética; suministro energético; emisiones CO ₂	N/A	UK
Boardman (2007)	2007	B	UK	N	Residencial	UKDCM	BREDEM	N/A	Uso de la energía; emisiones CO ₂	N/A	UK
Natarajany Levermore (2007)	2007	B	UK	N	Residencial	DECarb	BREDEM, Matlab	^(a) Algoritmo matemático	Demanda energética; emisiones CO ₂	N/A	UK
Jones et al (2007)	2007	B	UK	R; C	Residencial	EEP	SAP rating	^(a) Encuestas	Uso de la energía; emisiones CO ₂ ; costes; clase energética; MEE	SIG	Municipios de UK
Firth et al (2010)	2010	B	UK	N; C; B	Residencial	CDEM	BREDEM	⁽¹⁾ Extrapolación	Consumo energético; emisiones CO ₂	N/A	Inglaterra
Cheng y Steemer (2011)	2010	B	UK	N; C; B	Residencial	DECM	SAP rating; Microsoft Excel	^(a) Censo estadístico	Uso de la energía; emisiones CO ₂ ; MEE	N/A	Inglaterra
Hens et al. (2001)	2011	B	Bélgica	N	Residencial	VerBO2M	Ecuaciones estacionarias de balance de energía	⁽¹⁾ Extrapolación	Uso de la energía; emisiones CO ₂	N/A	Bélgica
Balaras et al. (2007)	2005	T	Europa; Grecia	N	Residencial	No definido	No definido	^(a) NHSS	Consumo energético; emisiones CO ₂ ; MEE	N/A	Parque helénico

Tabla 2.4 Revisión de metodologías para la evaluación energética del parque edificado (continuación)

Referencia	Año	Enfoque	Región	Escala	Sector	Metodología	Sistema de cálculo	Método predicción	Variables energéticas relacionadas	SIG	Caso de aplicación
Dascalaki et al. (2011)	2011	B	Grecia	N	Residencial	TABULA	TEE-KENAK software	⁽¹⁾ Extrapolación	Consumo energético; emisiones CO ₂ ; MEE; ahorros energéticos	N/A	Parque helénico
Theodoridou et al. (2011a)	2011	B	Grecia	N	Residencial	No definido	EnergyPlus basado en las especificaciones de la normativa TEE-KENAK	⁽¹⁾ Extrapolación	Consumo energético (calefacción)	N/A	Grecia
Theodoridou et al. (2011b)	2011	B	Grecia	C	Residencial	No definido	Análisis estadístico	⁽²⁾ Entrevistas puerta a puerta	Consumo energético (calefacción, refrigeración, ACS)	N/A	Ciudad de Thessaloniki y Kozani
Theodoridou et al. (2012)	2012	B	Grecia	C	Residencial	No definido	eCognition software tool	⁽¹⁾ Extrapolación	Potencial solar e implementación de energías renovables	SIG	Ciudad de Thessaloniki y Kalamaria
Dall'O' et al. (2012)	2011	B	Italia	R; C	Residencial	Metodología	CENED+ (region de Lombardia)	⁽¹⁾ Extrapolación	Demanda energética (calefacción); clase energética	SIG	Ciudad de Carugate
Caputo et al. (2013)	2012	B	Italia	C; B	Residencial; comercial	Metodología	EnergyPlus software	⁽¹⁾ Extrapolación	Consumo de energía final (calefacción, refrigeración, cocina, ACS; iluminación y equipamiento); MEE	SIG	Ciudad de Milán
Ascione et al. (2013)	2012	B	Italia	C; B	Todos	Metodología	EnergyPlus and DesignBuilder software	⁽¹⁾ Extrapolación	Demanda energética (calefacción, refrigeración); clase energética	SIG	Ciudad de Benevento
Fabbri et al. (2012)	2011	B	Italia	C; B	Edificios históricos; residencial; oficinas	No definido	Base de datos de certificados energéticos	⁽²⁾ SACE database	Consumo de energía primaria; clase energética	SIG	Ciudad de Ferrara
Mauro et al. (2015)	2015	B	Italia	R	Edificios rectangulares	SLABE	EnergyPlus software	⁽³⁾ Análisis de sensibilidad estadístico; Matlab	Demanda energética (calefacción, refrigeración); horas de confort; costes; MEE	N/A	Edificios de oficinas en el sur de Italia
Penna et al. (2015)	2014	B	Italia	C	Residencial	Metodología	TRNSYS; Matlab	⁽³⁾ Algoritmo matemático	Demanda energética de calefacción; costes; confort térmico	N/A	Ciudades de Messina y Milán
Gouveia et al. (2012)	2012	B	Portugal	N	Residencial	TIMES	ETSAP Programme	⁽³⁾ Datos estadísticos. Análisis de sensibilidad.	Demanda energética (calefacción, refrigeración); cocina; iluminación; equipamiento; confort térmico	N/A	Portugal

Tabla 2.4 Revisión de metodologías para la evaluación energética del parque edificado (continuación)

Referencia	Año	Enfoque	Región	Escala	Sector	Metodología	Sistema de cálculo	Método predicción	Variables energéticas relacionadas	SIG	Caso de aplicación
Salat (2009)	2009	T	Francia	C; B	Residencial	No definido	No especificado	⁽¹⁾ Extrapolación	Demanda energética (calefacción); consumo energético de calefacción; emisiones CO ₂	N/A	Ciudad de París
Florio y Teissier (2015)	2014	B	Francia	N; R	Residencial	TABULA	Algoritmo y base de datos de certificados energéticos francesa	⁽¹⁾ Análisis de sensibilidad estadístico	Clase energética; energía primaria	N/A	Francia
Fonseca y Schlueter (2015)	2014	B	Suiza	C; B	Todos	Modelo	FCS (EN ISO); TRANSYS; SIA; EnergyPlus; estadístico	⁽¹⁾ Extrapolación	Demanda energética; consumo energético; emisiones CO ₂ ; MEE	SIG	Distrito de Zug
Alkoezen et al. (2015)	2014	B	Suiza	B	Todos	QuBEC	Datos reales de consumo de gas	⁽¹⁾ Agregación estadística	Consumo energético de calefacción	SIG	Ciudad de Basilea
Mata et al. (2013)	2013	B	Suecia	N	Residencial	ECCABS	Simulink software	⁽¹⁾ Resultados procesados con Matlab software	Demanda energética; emisiones CO ₂ ; MEE	N/A	Suecia
Mickema et al. (2013)	2012	B	Alemania	N	Residencial	Modelo	Datos de diferentes fuentes	No especificado	Demanda energética	N/A	Alemania
Košir et al. (2014)	2013	B	Eslovenia	C; B	Residencial	No definido	SHADING software	⁽¹⁾ Extrapolación	Exposición solar en fachadas y cubiertas	N/A	Diferentes municipios
Terés-Zubiaga et al. (2013)	2013	B	España	C	Residencial (vivienda social)	No definido	Encuestas sobre facturas energéticas; monitorización edificios	⁽¹⁾ Extrapolación	Confort térmico (temperatura interior y humedad); consumo energético	N/A	Ciudad de Bilbao
Garrido-Soriano et al. (2012)	2011	B	España	R	Residencial	No definido	LIDER software	⁽¹⁾ Extrapolación	Demanda energética (calefacción, refrigeración); emisiones CO ₂ ; ahorro energético; costes	N/A	Cataluña
Instituto Valenciano de la Edificación (2014)	2014	B	España	N	Residencial	TABULA	CERMA software	⁽¹⁾ Extrapolación	Energía final; emisiones CO ₂ ; MEE	N/A	N/A

R; *Bottom-up*; T: *Top-down*; EU: European Union; US: United States; UK: United Kingdom; N: Nacional; R: Regional; C: Ciudad; B: Barrio; N/A: No aplicable

⁽¹⁾Extrapolación: cuando se evalúa un conjunto de tipologías edificatorias representativas y los resultados son extrapolados a la totalidad del stock, mediante agregación.

⁽²⁾Bases de datos: cuando el modelo se aplica a datos disponibles, generalmente procedentes de estadísticas nacionales o censos catastrales.

⁽³⁾Método de predicción complejo: cuando se desarrolla un modelo matemático o estadístico para predecir el comportamiento energético del parque edificatorio, atendiendo a la casuística de cada edificio.

Abreviaturas: SHEU: *Survey of Household Energy Use*, Estadística Canadá; RECS: *Residential Energy Consumption Survey*; IMPRO-Building: *Environmental Improvement Potentials of Residential Buildings*, European Commission; DECADE: *Domestic Equipment and Carbon Dioxide Emissions*, University of Oxford; NHSS: *National Hellenic Statistical Service*, en Grecia; SACE: *Sistema accreditation certificazione energetica degli edifici*, Región Emilia-Romagna; MEE: Medidas de Eficiencia Energética

Se observa que muchos de los estudios analizados se basan en un enfoque *bottom-up*, a excepción de Balaras et al. (2007) en Grecia, Estiri (2014) en US, Salat (2009) en Francia, Uihlein y Eder (2010) en Europa, que están desarrollados en el marco del enfoque *top-down*. Además, la mayoría de los estudios se centran en el sector residencial, con algunas excepciones como el desarrollado por Martins (2014) en Brasil, Ascione et al. (2013), Caputo et al. (2013) y Fabbri et al. (2012) en Italia, Fonseca y Schlueter (2015) en Suiza, Huang y Berkeley (2000) en US y Snäkin (2000) en Finlandia, que extienden su alcance a otros sectores como el comercial, el de oficinas, el público o el religioso. Sin embargo, hay estudios que únicamente están centrados en casos muy concretos, como es el trabajo realizado por Fabbri et al. (2012), que estudia los edificios históricos dentro de los sectores residencial y de oficinas. Muchos de los trabajos revisados desarrollan modelos concretos (Boardman, 2007; Cheng y Steemers, 2011; Dascalaki et al., 2011; Farahbakhsh et al., 1998; Gouveia et al., 2012; Hens et al., 2001; Huang y Berkeley, 2000; Johnston et al., 2005; Jones et al., 2007; Mata et al., 2013; Natarajan y Levermore, 2007; Shorrock y Dunster, 1997; Snäkin, 2000), mientras que otros simplemente definen una metodología (Ascione et al., 2013; Caputo et al., 2013; Dall'O' et al., 2012; Martins et al., 2014; Terés-Zubiaga et al., 2013) o presentan un caso de estudio (Balaras et al., 2007; Fabbri et al., 2012; Garrido-Soriano et al., 2012; Košir et al., 2014; Salat, 2009; Theodoridou et al., 2011b).

En cuanto a los sistemas de cálculo empleados, se puede decir que estos proceden de una naturaleza muy diferente. Aquellos modelos desarrollados específicamente para el Reino Unido están principalmente basados o bien en BREDEM (BREHOMES (Shorrock y Dunster, 1997), Johnston et al. model (Johnston et al., 2005), UKDCM (Boardman, 2007), DECarb (Natarajan y Levermore, 2007)), o bien en SAP rating (EEP (Jones et al., 2007) y DECM (Cheng y Steemers, 2011)), ambos creados por el *Building Research Establishment* (BRE, 2005). De la misma manera, a menudo los autores adoptan estándares nacionales basados en la legislación y utilizan herramientas desarrolladas específicamente para cada país como sistema de cálculo, como es el caso de HOT 2000 en Canadá (Farahbakhsh et al., 1998), DOE-2.1E en Estados Unidos (US) (Huang y Berkeley, 2000), TEE-KENAK en Grecia (Dascalaki et al., 2011), CENED+ en la región Lombardi de Italia (Dall'O' et al., 2012), LIDER en España (Garrido-Soriano et al., 2012), CERMA también en España (Instituto Valenciano de la Edificación, 2014) o ETSAP en Portugal (Gouveia et al., 2012). Sin embargo, otros autores se decantan por programas de cálculo reconocidos internacionalmente como EnergyPlus en el caso de (Ascione et al., 2013; Caputo et al., 2013; Fonseca y Schlueter, 2015; Mauro et al., 2015), Matlab (Martins et al., 2014; Mata et al., 2013; Mauro et al., 2015) o RADIANCE (Martins et al., 2014).

Con respecto al método de predicción empleado, este puede estar basado en tres enfoques:

- Extrapolación: cuando se evalúa un conjunto de tipologías edificatorias representativas y los resultados son extrapolados a la totalidad del parque edificado, mediante agregación.
- Bases de datos: cuando el modelo se aplica a datos disponibles, generalmente procedentes de estadísticas nacionales o censos catastrales.
- Método de predicción complejo: cuando se desarrolla un modelo matemático o estadístico para predecir el comportamiento energético del parque edificatorio, atendiendo a la casuística de cada edificio.

Aquellos estudios, generalmente los no basados en métodos de ingeniería, confían en datos disponibles en bases de datos oficiales (Aksoezen et al., 2015; Cheng y Steemers, 2011; Farahbakhsh et al., 1998; Gouveia et al., 2012; Johnston et al., 2005; Shorrock y Dunster, 1997; Uihlein y Eder, 2010), o utilizan entrevistas y encuestas a usuarios para obtener información sobre facturas energéticas y patrones de comportamiento (Jones et al., 2007; Terés-Zubiaga et al., 2013; Theodoridou et al., 2011b). Entre los que utilizan modelos complejos de predicción destacan los

desarrollados por Natarajan y Levermore (2007) y Penna et al. (2015), que desarrollan algoritmos matemáticos, Florio y Teissier (Florio y Teissier, 2015) y Mauro et al. (Mauro et al., 2015), que realizan análisis estadísticos de sensibilidad, y Mata et al. (2010), que procesa los resultados del análisis experimental con Matlab para desarrollar el modelo de predicción. El objeto de los modelos de predicción en algunos modelos es predecir diferentes escenarios (Estiri, 2014; Martins et al., 2014; Snäkin, 2000; Theodoridou et al., 2011b).

Por lo que concierne a las variables energéticas evaluadas, muchos de los estudios exploran el uso de la energía en sus diferentes modalidades (energía final consumida para calefacción, refrigeración, agua caliente sanitaria (ACS), iluminación y equipamiento). No obstante, la demanda energética es ampliamente estudiada por muchos de ellos (Ascione et al., 2013; Dall'O' et al., 2012; Fonseca y Schlueter, 2015; Garrido-Soriano et al., 2012; Gouveia et al., 2012; Huang y Berkeley, 2000; Johnston et al., 2005; Mata et al., 2013; Mauro et al., 2015; McKenna et al., 2013; Natarajan y Levermore, 2007; Salat, 2009; Snäkin, 2000). Mientras tanto, otros autores estudian las emisiones de carbono (Balaras et al., 2007; Boardman, 2007; Cheng y Steemers, 2011; Dascalaki et al., 2011; Farahbakhsh et al., 1998; Fonseca y Schlueter, 2015; Garrido-Soriano et al., 2012; Hens et al., 2001; Johnston et al., 2005; Jones et al., 2007; Mata et al., 2013; Natarajan y Levermore, 2007; Salat, 2009; Shorrock y Dunster, 1997; Snäkin, 2000), los costes (Garrido-Soriano et al., 2012; Jones et al., 2007; Mata et al., 2013; Mauro et al., 2015; Shorrock y Dunster, 1997), la calificación energética (Ascione et al., 2013; Dall'O' et al., 2012; Fabbri et al., 2012; Florio y Teissier, 2015; Jones et al., 2007) y medidas de eficiencia energética (MEE) (Balaras et al., 2007; Caputo et al., 2013; Cheng y Steemers, 2011; Dascalaki et al., 2011; Jones et al., 2007; Mata et al., 2013; Mauro et al., 2015). Aunque el confort térmico en el ambiente interior representa un aspecto fundamental para analizar el comportamiento pasivo de los edificios, sólo dos de los estudios lo tienen en cuenta. Terés-Zubiaga et al. (2013) analizó el confort térmico a través de la monitorización de diez viviendas para determinar la temperatura y la humedad, y Mauro et al. (2015) utilizaron simulación dinámica para determinar las horas de discomfort a las que estaban expuestos los usuarios. Por otro lado, otros autores (Košir et al., 2014; Martins et al., 2014) se centran en evaluar el potencial solar para diferentes propósitos, como por ejemplo, determinar la superficie disponible de cubierta en los edificios para instalar paneles fotovoltaicos, o maximizar las ganancias solares a través de las fachadas de los edificios para reducir la demanda energética de calefacción.

Con respecto a el uso de SIG, seis de los trabajos confían en esta tecnología para llevar a cabo los estudios (Ascione et al., 2013; Caputo et al., 2013; Dall'O' et al., 2012; Fabbri et al., 2012; Farahbakhsh et al., 1998; Fonseca y Schlueter, 2015; Jones et al., 2007; Martins et al., 2014), de los cuales sólo Jones et al. (2007) desarrolla específicamente un modelo que utiliza SIG para procesar información de edificios individuales para posteriormente agregar los resultados a un nivel geográfico intermedio.

Por lo tanto, se puede concluir de esta revisión que, una metodología adecuada de evaluación energética del parque edificado debe dar respuesta a la heterogeneidad de las características físicas de los edificios y del entorno edificado, las cuales pueden variar considerablemente incluso dentro de un mismo país y, además, debe ser versátil para poder adaptarse ampliamente al contexto específico de la región en la que ésta se implementa. Muchos de los estudios analizados tienen en cuenta un amplio rango de aspectos centrados en las especificidades de la región en la que se desarrollan, como es el caso de aquellos que utilizan metodologías *ad hoc* y programas basados en la legislación territorial. Sin embargo, no todos ellos pueden aplicarse directamente a cualquier región ni combinan diferentes tecnologías para mejorar la eficacia de sus métodos. De hecho, Kavgi et al. (2010) ya revisaron exhaustivamente diferentes técnicas para modelar el consumo energético en el sector residencial con un enfoque *bottom-up*. Pero después de realizar un crítico análisis, destacaron la necesidad creciente de continuar desarrollando metodologías más sofisticadas que incorporen aspectos multidisciplinares.

2.5 EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS

Una vez revisadas las metodologías existentes para analizar energéticamente el parque edificatorio existente, se observa que todas ellas se basan en el estudio del uso de la energía de los edificios que lo componen, a partir de simulaciones energéticas mayoritariamente. Por tanto, la evaluación energética de los edificios representa otro elemento clave, que va a ser analizado en este apartado desde diferentes perspectivas:

- Relación entre demanda energética y consumo energético
- Parámetros de cálculo que deben ser considerados en la evaluación energética
- Herramientas informáticas de simulación energética

La simulación energética de edificios trata de estimar el comportamiento térmico de las diferentes zonas que conforman el edificio y las prestaciones que están dando las instalaciones y equipos en las condiciones de trabajo puntuales en cada instante de tiempo, con el fin de integrarlas durante el periodo de tiempo simulado.

El objetivo de la simulación térmica o energética de edificios puede ser diverso. Se pueden analizar los consumos de energía y las emisiones de CO₂ asociadas, analizar el comportamiento de los equipos o sistemas de climatización y ventilación, observar la evolución de la temperatura y la humedad relativa de las diferentes zonas del edificio, o analizar las condiciones de confort térmico interiores, entre otros.

La simulación debe realizarse en todo un periodo anual, subdividido en franjas de tiempo menores, que generalmente son horarias. Ello permite descender a un nivel pormenorizado de análisis que proporcione una información bastante precisa sobre el comportamiento de un edificio.

En la simulación pueden incluirse las instalaciones que originen un consumo de energía, como son la calefacción, la refrigeración, el ACS y la iluminación. En este caso, la simulación proporcionará información sobre el consumo energético del edificio y sus emisiones de CO₂ asociadas. Sin embargo, las instalaciones pueden no incluirse, en cuyo caso la simulación proporcionará información sobre el comportamiento pasivo del edificio, es decir, sobre su funcionamiento energético en condiciones libres teniendo en cuenta únicamente el diseño del edificio (sus características dimensionales y morfológicas) y sus características constructivas. En este caso, el consumo energético no podrá ser determinado, ni tampoco sus emisiones de CO₂, pero sí podrá ser estimada la demanda energética de dicho edificio, definida como la energía útil necesaria que tendrían que proporcionar los sistemas técnicos para mantener en el interior del edificio unas condiciones óptimas de confort en función del uso del edificio y del clima en el que se ubique (CTE, 2013). La demanda energética, de la misma manera que el consumo, se puede dividir en demanda energética de calefacción, de refrigeración, de ACS y de iluminación.

En relación a estos dos conceptos, consumo energético y demanda energética, cabe indicar ciertas puntualizaciones. Por un lado, el consumo energético asociado a un edificio no siempre da una medida de las necesidades energéticas reales, pues en él influyen otros factores que son enormemente variables, como son la ocupación y la condición socio-económica de sus ocupantes. Así pues, una vivienda puede tener una alta demanda energética debido a sus deficientes prestaciones y, sin embargo, tener asociado un consumo energético casi nulo. Esta situación puede darse en el caso de usuarios con un nivel de renta bajo que se encuentren en riesgo de pobreza energética y que no puedan hacer frente al coste económico que supondría poner en funcionamiento las instalaciones térmicas. En esta situación, la vivienda no consumirá energía y no emitirá CO₂ en relación a dicha instalación, pero sus ocupantes se mostrarán disconformes con las condiciones interiores. O, una vivienda desocupada o utilizada solamente en periodo vacacional,

Tanto la demanda como el consumo se expresan en términos de kWh/m²año.

Así pues, mientras que la demanda energética de un edificio indica la cantidad de energía necesaria para mantener las condiciones de confort en su interior, el consumo energético expresa la cantidad de energía consumida por los equipos y, por ende, el impacto económico y ambiental asociado a estos.

En los próximos apartados, 2.5.1 y 2.5.2, se definen los parámetros de cálculo que deben ser tenidos en cuenta para llevar a cabo una simulación energética y se revisa el estado del arte en cuanto a programas de simulación energética de edificios, respectivamente.

2.5.1 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS DE CÁLCULO

En los procesos de evaluación energética de edificios deben asumirse ciertos parámetros que resultan fundamentales para analizar su comportamiento. Estos son: las solicitaciones exteriores definidas por el clima de la región, las solicitaciones interiores y condiciones operacionales, las características morfológicas y constructivas del edificio, las condiciones de soleamiento y sombras y los sistemas técnicos. Variaciones en dichos parámetros provocarán diferencias notables, por lo que estos deben ajustarse con valores lo más próximos posible a la realidad, de forma que estén adecuadamente adaptados al contexto urbano y del edificio. Los siguientes apartados definen cuáles son y cómo se definen los parámetros de cálculo para la simulación energética.

2.5.1.1 Solicitaciones exteriores

Se consideran solicitaciones exteriores las acciones del clima sobre el edificio con efecto sobre su comportamiento térmico y, por tanto, sobre su demanda energética. Las condiciones climáticas describen las condiciones del lugar en el que el edificio está ubicado. Existen plantillas con las condiciones climáticas definidas para un gran abanico de ciudades a nivel mundial disponibles en la página web del programa EnergyPlus (U.S. Department of Energy, 2013), que pueden ser tomadas como climas de referencia. El CTE, a efectos de cálculo, establece para el territorio español un conjunto de zonas climáticas para las que se define un clima de referencia, con las solicitaciones exteriores en términos de temperatura y radiación solar. Estos valores se encuentran tabulados y recogidos en los climas de referencia para cada zona climática, proporcionados por la Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo, del Ministerio de Fomento.

2.5.1.2 Solicitaciones interiores y condiciones operacionales

Se consideran solicitaciones interiores las cargas térmicas generadas en el interior del edificio debidas a los aportes de energía de los ocupantes, equipos e iluminación. Las condiciones operacionales se definen por las temperaturas de consigna y las cargas internas debidas a la ocupación, a la iluminación y a los equipos.

A continuación, se enumeran y describen dichos parámetros:

- **Densidad de ocupación** (personas/m²): establece el número de personas por unidad de superficie que ocupan cada zona definida en el edificio. Generalmente, este valor depende del uso al que se destina cada espacio, residencial o terciario.
- **Patrones de comportamiento de los ocupantes.** La ocupación está controlada por unos horarios en los que se prevé dicha ocupación en el edificio. Se puede diferenciar entre días laborables, fines de semana e incluso días festivos, que pueden ser programados tanto en lo que a horario se refiere, como a intensidad de ocupación.

- **Tasa metabólica (W/persona).** La tasa metabólica indica el nivel de actividad de las personas que habitan el espacio interior del edificio y determina la cantidad de ganancia de calor por persona en cada zona del mismo. El calor es generado en el cuerpo humano por oxidación en una ratio denominada tasa metabólica, como consecuencia de la actividad humana. Este calor es disipado por la superficie corporal y la respiración a través de los procesos de radiación, convección y evaporación. El factor metabólico se establece en 1 para hombres, 0,85 para mujeres y 0,75 para niños. La proporción relativa de calor sensible y latente generado por una persona es una función compleja entre la tasa metabólica y las condiciones ambientales.
- **Nivel de vestimenta.** La vestimenta reduce la pérdida de calor corporal y es clasificada según el valor de aislamiento térmico que proporciona. La unidad generalmente usada para medir el aislamiento de la vestimenta es el Clo (1 Clo=0,155 m²C/W). Los Clo pueden ser calculados por adición del Clo asociado a cada prenda de vestir, los cuales, según la norma ISO 7730 (AEN/CTN 81, 2006), son los que se presentan en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Clo según el nivel de vestimenta ISO 7730 (AEN/CTN 81, 2006)

Prenda de vestir	Valor de Clo
Desnudez	0,0
Calzoncillos, bragas	0,06
Camiseta	0,09
Bragas y sujetador	0,05
Ropa interior larga	
Superior	0,35
Inferior	0,35
Camisa	
Ligera, manga corta	0,14
Gruesa, manga larga	0,29
Añadir 5% por corbata o cuello alto	+5%
Falda	0,22-0,70
Pantalones	0,26-0,32
Jersey	0,20-0,37
Calcetines	0,04-0,10
Traje o vestido de verano ligero	0,30
Ropa de trabajo	0,80
Combinación de ropa de invierno típica	1,0
Traje	1,5

- **Temperaturas de consigna (°C).** Indica la temperatura ideal (por ejemplo, la fijada en el termostato de los espacios, individualmente o en el edificio completo) a partir de la cual la operación de los sistemas térmicos es necesaria. Se establece una temperatura de consigna para refrigeración, en periodo de verano, y una temperatura de consigna para calefacción, en periodo de invierno. Si se tiene en consideración la ventilación natural del edificio para refrigerarlo de forma natural, también es posible establecer una temperatura de consigna de ventilación natural para indicar el límite a partir del cual deben operar o no los sistemas de refrigeración durante el periodo estival.
- **Ganancias internas (W/m²).** Además de las cargas generadas por la propia ocupación, el equipamiento también es responsable del aumento de las cargas internas en el interior de los espacios del edificio, que harán aumentar la demanda de refrigeración en verano y reducirán la de calefacción en invierno. Se establece un valor en vatios por unidad de superficie.

- **Tasa de infiltración de aire** (renovación/hora). La ventilación natural viene definida por la tasa de renovaciones hora en cada espacio o a nivel de edificio. El caudal de aire en m^3/s a una presión normal se transforma a renovaciones/hora (r/h) según la siguiente expresión:

$$r / h = \frac{m^3 / s}{V_{zona}(m^3)} \cdot 3600$$

donde,

m metros

s segundos

h hora

V volumen

La ventilación también se define por la cantidad aire exterior mínimo que entra al edificio por persona, mediante litros/segundo por persona (l/s persona) o por unidad de superficie ($l/s \cdot m^2$).

2.5.1.3 Definición morfológica y constructiva del edificio

En relación a la configuración física del edificio, existen dos factores clave que influyen en su demanda energética y que será necesario controlar para reducirla. El primero de ellos es el propio diseño del edificio, es decir, las características dimensionales que definen su morfología. El segundo, es la calidad constructiva de su envolvente térmica.

Según el Código Técnico de la Edificación (CTE, 2013), la envolvente térmica de un edificio está compuesta por todos los cerramientos que delimitan los espacios habitables con el aire exterior, el terreno u otro edificio, y por todas las particiones interiores que delimitan los espacios habitables con espacios no habitables en contacto con el ambiente exterior. En definitiva, la envolvente térmica se considera como la piel del edificio y debe cumplir con la función de limitar la transferencia de calor entre el ambiente interior y el exterior, ayudando a mantener estables las condiciones interiores óptimas de confort. Será, pues, la responsable principal de limitar la demanda energética del edificio. Los elementos del edificio que la componen, tal y como se indica en la Figura 2.6, según su posición y adyacencia, son los siguientes: muro exterior, muro enterrado, muro interior, cubierta plana, cubierta inclinada, suelo sobre el terreno, suelo enterrado, suelo exterior, suelo interior, puerta, abertura.

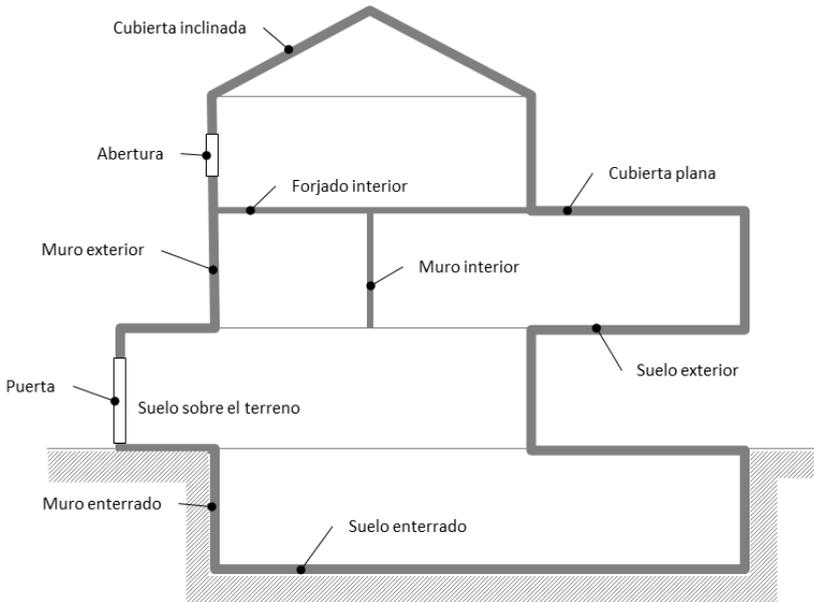


Figura 2.6 Cerramientos de la envolvente térmica del edificio

Cada elemento de la envolvente, y por tanto cada solución constructiva, lleva asociada una determinada transmitancia térmica (U) que se define como el flujo de calor, en régimen estacionario, para un área y diferencia de temperatura unitarias de los medios situados a cada lado del elemento que se considera (CTE, 2013), y se expresa en (W/m^2K) según la expresión:

$$U = \frac{1}{\sum R_i} [W/m^2K]$$

La transmitancia térmica es inversamente proporcional a la resistencia térmica (R , m^2K/W), la cual se calcula mediante el sumatorio de las resistencias térmicas parciales de las capas que conforman un cerramiento. La resistencia térmica de un elemento se determina por la expresión:

$$R = \frac{e}{\lambda} [m^2K/W]$$

donde,

e espesor del elemento [m]

λ conductividad térmica del elemento [W/mK]

Para cada uno de estos cerramientos que componen el edificio, se debe definir una solución constructiva mediante la introducción de las diversas capas que lo conforman, lo que dará como resultado la transmitancia térmica del elemento (U , W/m^2K).

Además, se deben definir las aberturas mediante indicación del tipo de marco, el factor de marco y el tipo de acristalamiento, lo que dará también como resultado una U relativa a elementos transparentes.

Al igual que para los cerramientos opacos y transparentes, se deben definir las características de los puentes térmicos, por lo que se deberá especificar la transmitancia térmica lineal (W/mK) en los encuentros de: cubierta-muro, muro-suelo terreno, muro-muro, muro-suelo, dintel, alféizar y jambas.

2.5.1.4 Condiciones de soleamiento y sombras

La radiación directa de onda corta, tanto si incide en el exterior de un cerramiento como si lo hace en el interior tras atravesar un acristalamiento, supone un aporte de energía no uniforme espacialmente sobre las superficies.

En general, las condiciones de insolación y sombreadamiento pueden ser debidas a diversas causas: por sombras propias del edificio, por sombras de elementos accesorios del edificio, por sombras externas y por sombras geográficas generadas por el entorno topográfico.

- Sombras por el propio edificio. El propio edificio puede reflejar la radiación en alguna superficie del mismo, dependiendo de su morfología. Si las superficies son opacas provocan radiación solar difusa, mientras que si son de vidrio provocan radiación especular. Ver Figura 2.7.

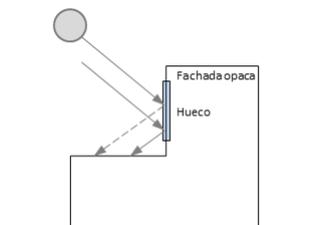


Figura 2.7 Reflexión solar de las superficies del edificio sobre el mismo u otro edificio (DesignBuilder UK, 2015a)

- Sombras por elementos accesorios del edificio y sombras externas (voladizos, edificios circundantes) que generan radiación difusa y reflectancia, derivada de las propiedades de los materiales que componen los muros y los huecos. Ver Figura 2.8.

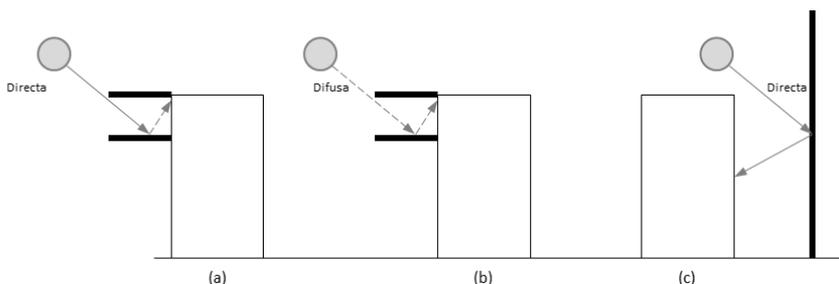


Figura 2.8 Reflectancia solar en el edificio producida por obstrucciones. Reflexión difusa de la radiación directa sobre la superficie de un voladizo (a), reflexión difusa de la radiación solar del cielo en un voladizo (b), reflexión directa especular desde la superficie de la fachada de un edificio adyacente constituida por vidrio (c) (DesignBuilder UK, 2015a)

- Superficie del terreno. El sombreado del terreno causado por los edificios afecta a la reflexión directa. La radiación difusa en edificios procedente de la incidencia de radiación directa sobre el terreno, sólo ocurre en zonas iluminadas o soleadas (A y C), pero no en zonas sombreadas (B). Ver Figura 2.9.

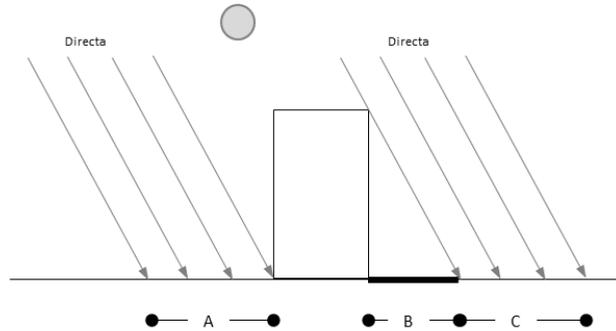


Figura 2.9 Reflexión difusa sobre el terreno (DesignBuilder UK, 2015a)

Así pues, las protecciones solares del edificio juegan un papel muy importante, por lo que los elementos de sombreado en puertas y ventanas transparentes presentes en el edificio deben ser incluidos en el cálculo, ya que reducen las ganancias solares y aumentan la resistencia a la conducción del calor debido al efecto de éstos. Los dispositivos de protección solar pueden constituirse por lamas, persianas o vidrios con prestaciones especiales (inteligentes, electrocrómicos, con control solar, etc.). Se debe especificar también la posición de los dispositivos (interior, exterior, incorporada entre el propio vidrio), ver Figura 2.10.

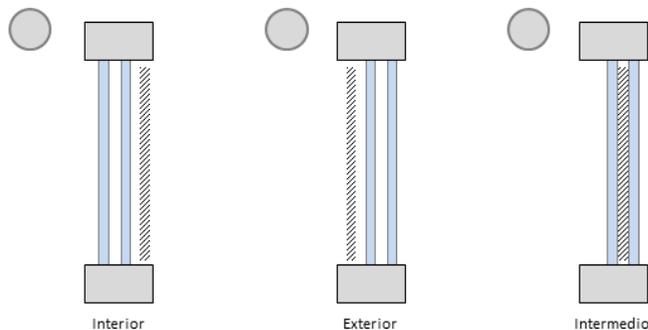


Figura 2.10 Posición de los dispositivos de protección solar con respecto al hueco (DesignBuilder UK, 2015a)

2.5.1.5 Sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) y agua caliente sanitaria (ACS)

Los sistemas técnicos que se incorporan al edificio para satisfacer la demanda energética pueden ser los siguientes: sistema de ACS, sistema de refrigeración, sistema de calefacción, sistema de iluminación, sistema de ventilación y sistema de control de la humedad. Las propiedades de cada uno de estos sistemas deberán ser definidas para poder ser simuladas.

Ahora bien, como se ha comentado anteriormente, los sistemas pueden ser necesarios o no. En la situación ideal de que la demanda energética de calefacción y/o refrigeración en un edificio fuera nula, no sería necesario incorporar o poner en funcionamiento los equipos, lo que no generaría ningún consumo.

Algunos programas de cálculo permiten considerar la ventilación natural del edificio, a través de sus condiciones de operación (periodo anual y horario de apertura de ventanas, así como caudal estimado de entrada de aire) y temperatura de consigna, lo que puede resultar interesante al poder contribuir esta a reducir la demanda energética de refrigeración.

2.5.2 HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA

La demanda energética es muy variable con el tiempo, y depende de las condiciones ambientales o zona climática, del tipo de edificio y sus características térmicas, y del uso y control que se establezca en el mismo (ATECYR, 2008). Además, se debe tener en cuenta el concepto de inercia térmica, el cual representa la velocidad con la que cualquier variación de las condiciones ambientales produce un efecto sobre las condiciones térmicas interiores del edificio y, por tanto, sobre su demanda. Esta inercia nunca es despreciable, lo que conlleva el uso de procedimientos no estacionarios para acercarnos a establecer con rigor la demanda energética del edificio, especialmente en el caso de la refrigeración, cuando las condiciones ambientales oscilan sobre la temperatura de consigna.

Los equipos varían sus prestaciones (rendimiento, potencia útil, COP (*coefficient of performance*), etc.) con las condiciones ambientales y con la proporción de carga que compensan en un cierto instante sobre sus prestaciones nominales. Por lo tanto, un procedimiento estacionario basado en rendimientos estacionales solo produce una aproximación al valor del consumo real en términos totales, y a las condiciones pico y cargas máximas de calefacción y refrigeración (Beattie y Ward, 1999), pero no permite conocer qué ocurre en los diferentes momentos del tiempo.

Por estos motivos, una simulación energética que aspire a proporcionar información precisa debe basarse en procedimientos dinámicos, los cuales sí son capaces de estimar con precisión la transferencia de energía en un edificio y explicar su funcionamiento en los diversos instantes temporales a lo largo de todo un año.

Existen diversos programas y herramientas de cálculo para la simulación energética de edificios. Algunas de ellas, generalmente las desarrolladas para la verificación de las normativas a nivel estatal de forma simplificada, están basadas en procedimientos estacionarios, como por ejemplo, en España, el CERMA (ATECYR y Universidad Politécnica de Valencia, 2011), CE3X (CENER y EFINOVATIC, 2012) o CE3 (CENER y EFINOVATIC, 2012).

A continuación, se revisan las herramientas informáticas de simulación energética dinámica más extendidas a nivel mundial, que se describen de forma general en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Características generales de los programas de simulación dinámica

Herramienta	Desarrollador	Año	País	Licencia
TRNSYS Transient System Simulation Tool	 TRNSYS 17	Universidad de Wisconsin Thermal Energy System Specialists, LLC	1995 US	Comercial
eQUEST Transient System Simulation Tool	 eQUEST	James J. Hirsch & Associates Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) United States Department of Energy	1990 US	Libre
EnergyPlus	 EnergyPlus	University of Illinois Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) United States Department of Energy	1990 US	Libre
Ecotect	 AUTODESK ECOTECT ANALYSIS	Autodesk	US	Comercial
BSim (Building simulation)		Danish Building Research Institute	2008 Dinamarca	Comercial
ESP-r	-	Department of Mechanical and Aerospace Engineering University of Strathclyde (Glasgow)	1974 UK	Libre
IDA-ICE (Indoor Climate Energy)	 EQUA	EQUA	1990 Suecia	Comercial
HULC (Herramienta Unificada LIDER- CALENER)	 LIDER + CALENER  CTE	Universidad de Sevilla	2013 España	Libre

En Estados Unidos, durante la década de 1970 surgió DOE-2 (U.S. Department of Energy, 1970) como iniciativa de la administración americana. En la misma época, se desarrolla también en Estados Unidos la herramienta BLAST (*Building Loads Analysis and Systems Thermodynamics*) (U.S. Department of Defense, 1970). Años más tarde, las mejores características de cada uno de ellos se combinan para dar lugar a un nuevo programa llamado EnergyPlus (U.S. Department of Energy, 2013), el cual ofrece un potente motor de cálculo de simulación (Crawley et al., 2001). Sin embargo, el mayor hándicap que este presenta es que no ofrece una interfaz gráfica que permita visualizar el modelo del edificio generado, lo que dificulta también el proceso de introducción de datos.

Otros programas como el TRNSYS (*Transient Simulation of Systems*), desarrollado inicialmente por la Universidad de Wisconsin-Madison (Thermal Energy System Specialists, 1995), tienen un ámbito de existencia generalmente universitario, aunque recientemente se han creado aplicaciones para generar los modelos geométricos en 3D a simular con mayor facilidad que le otorgan un carácter más comercial.

En Europa, por el contrario, no existe en estos momentos una organización que centralice y aúne el esfuerzo para el desarrollo de este tipo de programas, como ocurre en Estados Unidos. Por ello, son los propios estados miembros los que desarrollan, por iniciativa propia, herramientas de simulación (ATECYR, 2008). En Dinamarca, existe BSim (Danish Building Research Institute, 2008), desarrollado por el Instituto Danés para la investigación en edificios, en Inglaterra, ESP-r (University of Glasgow, 1974), de la Universidad de Strathclyde de Glasgow, de código abierto, y en Suecia, el IDA-ICE (EQUA, 1990), un programa comercial con un motor de simulación común y módulos con diversas aplicaciones. Existen también empresas que producen programas comerciales para la introducción de la geometría del modelo de una forma más sencilla e intuitiva, como por ejemplo IISiBat (CSTB,

2016), en Francia, que utiliza como motor de cálculo el TRNSYS, o DesignBuilder (DesignBuilder UK, 2015b) en Inglaterra, que ayuda a generar un fichero (en formato .idf) que es interpretado por EnergyPlus. En España existe el programa CALENER VyP, recientemente integrado en Herramienta Unificada LIDER-CALENER (Universidad de Sevilla, 2013), la cual emplea el motor de cálculo DOE-2 y ha sido especialmente desarrollada para justificar el cumplimiento de la normativa de ahorro de energía del CTE (DB HE0 y HE1) y la certificación energética de edificios.

La Tabla 2.6 muestra las características generales de ocho de los programas más extendidos. En la Tabla 2.7 se analizan y comparan, detalladamente, las capacidades de cada uno de ellos.

Tabla 2.7 Comparación de las capacidades de los programas de simulación dinámica (ATECYR, 2008)

Capacidades relativas a...	TRNSYS	eQUEST	EnergyPlus	Ecotect	BSim	Esp-r	IDA-ICE	HULC
Geometría								
Importación de la geometría desde programas CAD	•			•	•		•	•
Número de zonas/superficies/equipos/sistemas ilimitados	•	•	•	•	•	•	•	•
Cargas térmicas								
Balance de energía	•	•	•	•	•	•	•	•
Tiene en cuenta la absorción de vapor por los materiales	•		•			•		•
Tiene en cuenta la masa térmica	•	•	•	•	•	•	•	•
Confort humano	•	•	•	•	•	•	•	•
Cálculos automáticos para dimensionar los equipos (día de diseño)	•	•	•	•	•		•	
Análisis solar								
Radiación solar directa y reflexiones a través de ventanas		•	•	•	•		•	•
Radiación solar difusa (diferenciación si proviene del cielo o reflejada del suelo)		•	•				•	
Radiación solar reflejada del entorno (edificios próximos u otros elementos)	•	•	•				•	
Transmitancia variable de los elementos que sombrean			•	•				
Asistente para optimizar sombras				•				
Programación del horario de los elementos de sombra por el usuario	•	•	•	•	•		•	
Opciones de acristalamientos								
Posibilita la inclusión de persianas en los acristalamientos	•	•	•	•	•	•	•	•
Posibilita la inclusión de persianas dentro de los acristalamientos múltiples	•	•	•	•		•	•	
Posibilita la inclusión de vidrios electrocromáticos/termocromáticos		•	•	•		•	•	
Posibilita la inclusión de vidrios con gases especiales			•	•		•		
Incluye una base de datos de vidrios	•	•	•	•			•	•
Cálculos de la envolvente térmica								
BLAST			•					
DOE-2		•	•					•
ASHRAE			•					
Definido por el usuario	•		•			•	•	
Otros					•	•	•	
Control de la luz natural								
Iluminación interior por ventanas y lucernarios		•	•	•	•	•	•	
Reflexión de la luz natural en el interior		•	•			•		
Conducción a través de superficies								
1D	•	•	•	•	•	•	•	•
2D y/o 3D			•			•		
Conducción al terreno								
1D	•	•	•	•	•	•	•	•
2D y/o 3D			•					
Ventilación e infiltración								
Tiene en cuenta las infiltraciones por zonas	•	•	•	•	•	•	•	•
Tiene en cuenta la ventilación natural			•		•		•	
Tiene en cuenta la ventilación híbrida (natural y mecánica)					•		•	
Apertura de ventanas controlable para ventilación			•			•		
Ventilación nocturna para refrigeración	•	•	•	•		•	•	

Tabla 2.7 Comparación de las capacidades de los programas de simulación dinámica (continuación)

	TRNSYS	eQUEST	EnergyPlus	Ecotect	BSim	Esp-r	IDA-ICE	HULC
Capacidades relativas a...								
Sistemas de energías renovable o bioclimáticos								
Muros trombe	•	•	•	•	•	•	•	•
Captadores solares	•		•	•		•		•
Sistemas solares definidos por el usuario	•							
Paneles fotovoltaicos		•	•	•	•	•		
Energía eólica	•					•		
Sistemas HVAC								
Dimensionado automático de equipos		•	•		•		•	
Unidades terminales de aire forzado (fancoil, ventilador, calentador, etc.)		•	•		•	•	•	•
Equipos unitarios (expansión directa, calderas, bomba de calor aire-aire/aire-agua)	•	•	•		•			•
Control de humidificación/deshumidificación	•	•	•		•	•	•	
Intercambiadores de calor	•	•				•	•	
Equipos de producción de frío	•	•	•	•	•	•	•	•
Equipos de condensación/evaporación	•	•	•			•	•	•
Equipos de producción de calor	•	•	•			•	•	•
Recuperadores de calor aire-aire	•	•	•		•	•	•	
Agua caliente sanitaria (ACS)	•	•	•			•	•	•
Incluye termostatos y estrategias de control	•	•	•		•	•	•	
Emisiones medioambientales								
Gases efecto invernadero (CO ₂ , CO, CH ₄ , NO _x)		•	•			•		•
Contaminantes (Pb, PM, SO ₂)			•					
Precusores de ozono (NH ₃ , CH ₄ , NMVOC)			•					
Contaminantes peligrosos (Pb, Hg)								
Datos meteorológicos								
Los datos están integrados en el programa		•	•	•	•	•	•	•
Análisis económico								
Coste de la energía y tarifas	•	•	•		•	•	•	
Coste de ciclo de vida	•	•	•					
Resultados e informes								
Cargas térmicas: horaria, semanal, mensual, anual	•	•	•		•	•	•	
Uso final de la energía	•	•	•	•	•	•	•	•
Demanda pico (carga térmica)	•	•	•	•	•	•	•	•
Demanda pico por horas/días/semanas	•	•	•					
Consumo por tipo de energía	•	•	•	•			•	
Interfaz gráfica intuitiva								
Permite la visualización del modelo durante la introducción de datos		•		•	•	•	•	•

Como se desprende de la Tabla 2.7, la herramienta TRNSYS es bastante polivalente, pues permite la definición de sistemas de acondicionamiento complejos, energías renovables e incluso modelar sistemas constructivos no convencionales (como cerramientos bioclimáticos), así como es capaz de proporcionar resultados de una forma muy detallada (horaria, por uso final de la energía, por tipo de energía, etc.). Sin embargo, la introducción de datos es tediosa y la interfaz del programa no resulta demasiado intuitiva. El análisis solar tampoco es un punto fuerte de la herramienta.

eQUEST ofrece un proceso intuitivo y rápido para la introducción de datos y es capaz de generar informes detallados de resultados. También permite la introducción de una gran variedad de sistemas y equipos de acondicionamiento, pero no proporciona datos sobre emisiones medioambientales. Tampoco realiza un análisis solar exhaustivo ni proporciona información sobre el confort térmico de los ocupantes.

El programa EnergyPlus puede decirse que es el más completo de todos, pues incorpora prácticamente la totalidad de las capacidades analizadas. El abanico de posibilidades que ofrece es tan amplio, que puede modelarse casi cualquier tipo de instalación o sistema constructivo de un edificio. Su gran inconveniente, como se apunta anteriormente, es que no posee una interfaz gráfica intuitiva, por lo que su manejo es tedioso. No obstante, se han desarrollado algunas interfaces que facilitan la modelización de la geometría y la introducción de datos del edificio para posteriormente simular a través del motor de cálculo de EnergyPlus. Es el caso de DesignBuilder, como programa comercial, y Open Studio (2016), como programa libre.

Ecotect se presenta como una herramienta muy adecuada para el análisis del soleamiento, pues fue concebida específicamente para ello, pero se muestra más limitada a la hora de realizar cálculos térmicos que incluyan, por ejemplo, los sistemas de acondicionamiento activo y las energías renovables. La herramienta no es capaz de proporcionar datos sobre emisiones medioambientales, o resultados de cargas térmicas detallados, es decir, de forma horaria.

BSim, Esp-r e IDA-ICE tienen capacidades bastante similares. Las tres herramientas permiten la introducción de la geometría a través de programas CAD y tienen una interfaz visual que facilita la entrada de datos. Tienen en cuenta un alto grado de detalle de información para el cálculo de las cargas térmicas y proporcionan datos sobre confort térmico. El análisis solar es algo limitado, concretamente Esp-r no lo considera. Las tres herramientas ofrecen la posibilidad de incluir la ventilación en la dinámica del edificio, aunque solo Esp-r permite controlar la programación de dicha ventilación por el usuario. Las tres poseen un gran abanico de posibilidades a la hora de introducir sistemas y, de nuevo, Esp-r es la que ofrece mayores posibilidades a la hora de introducir energías renovables. En cuanto a los datos de emisiones medioambientales, Esp-r permite la obtención de información sobre gases de efecto invernadero. Cualquiera de las tres herramientas proporciona información detallada de resultados, alcanzando el nivel horario.

La HULC, a pesar de ser una herramienta de simulación dinámica, los cálculos que ofrece son bastante limitados. Incorpora prácticamente todos los aspectos principales analizados en la Tabla 2.7 pero sin gran nivel de detalle, y su rigidez no permite introducir soluciones constructivas o sistemas de acondicionamiento, más allá de los meramente incluidos en la base de datos del programa. Los resultados proporcionados por la herramienta dan muestra de las cargas totales pico, pero los resultados no se muestran de forma horaria. Por otro lado, el desarrollo de la herramienta específicamente para el contexto español, hace que no pueda ser utilizada en otras regiones. Por ejemplo, los datos climáticos que incorpora son los propios de las zonas climáticas del territorio español y no permite definir nuevos datos meteorológicos por el usuario.

Tras analizar dichas herramientas, se identifica como requerimiento destacado a incluir por una herramienta de simulación, el poseer una interfaz intuitiva que facilite tanto la modelización de la geometría del edificio como la introducción de la información sobre sistemas constructivos e instalaciones. También es de notable importancia la posibilidad de incorporar datos climáticos de cualquier región y de proporcionar los resultados de forma detallada, que ofrezcan al usuario la posibilidad de llevar a cabo un análisis energético exhaustivo del edificio estudiado. La selección de un programa para la simulación energética deberá dar respuesta a las necesidades de cada caso y ser capaz de proporcionar los resultados que se pretendan obtener con la simulación energética.

2.6 CONCLUSIÓN

En este capítulo se realiza una revisión del estado del arte de las principales temáticas que se abordan en la tesis: el marco legislativo que rodea a la eficiencia energética de los edificios, las

herramientas de evaluación de la sostenibilidad urbana, las metodologías de evaluación energética del parque edificatorio y, por último, los aspectos que deben ser considerados durante la evaluación energética de edificios y las herramientas de cálculo disponibles.

En relación al marco legislativo relativo a la eficiencia energética de edificios, se han revisado las directivas a nivel europeo y la legislación que las concreta a nivel nacional dentro del territorio español. En este sentido, el crecimiento acelerado del sector de la construcción en los últimos años y la escasa celeridad en la transposición de las directivas, han provocado que gran parte del parque edificatorio español no esté sujeto a los últimos estándares energéticos, lo que deja, por otro lado, un parque con un amplio potencial de mejora para alcanzar los objetivos establecidos en los últimos acuerdos internacionales sobre cambio climático.

En relación a los indicadores de evaluación de la sostenibilidad urbana, se han revisado las principales herramientas de referencia existentes, tanto a nivel internacional como nacional, y que proporcionan un conjunto de indicadores para evaluar las diferentes dimensiones de la sostenibilidad. Como principal conclusión de esta revisión, se extrae que una herramienta debe ser adaptable a las características del entorno en el cual se aplica, amparando tanto los aspectos físicos, económicos, como sociales. Así, una herramienta demasiado globalizada no proporcionará un diagnóstico adecuado del área urbana analizada, si no es capaz de tener en cuenta las particularidades de su entorno. Sin embargo, puesto que el objetivo de la tesis está relacionado con el aspecto energético pasivo del parque edificatorio, es necesario profundizar más en el análisis de los indicadores que permiten cuantificar este aspecto.

En relación a las metodologías de evaluación energética del parque edificatorio, se extrae una conclusión muy similar a la anterior, lo que la reafirma. Una metodología adecuada de evaluación energética debe ser planteada de forma general y ser capaz de adaptarse a las especificidades de la región donde vaya a ser implementada. Las metodologías revisadas de la literatura están desarrolladas específicamente para una región determinada, por lo que no pueden replicarse con facilidad en otras áreas urbanas. Por tanto, el carácter genérico es un aspecto importante a tener en cuenta cuando se plantea una metodología de evaluación energética. Por ello, resulta necesario llevar a cabo un estudio de los aspectos considerados en cada una de las metodologías, de una forma pormenorizada, para contribuir a la selección de las variables para la realización de este trabajo.

Los métodos de evaluación energética pueden tener en cuenta diversas variables para proporcionar información sobre el comportamiento de un parque edificado. El consumo energético, la demanda energética, las cargas térmicas, las emisiones de CO₂, los costes, los resultados de implementar medidas de eficiencia energética o el confort térmico, entre otros. La elección de unos aspectos u otros dependerá del objetivo que se pretenda alcanzar con la evaluación. El sistema de cálculo por el que se opta también es diverso; en muchos casos se toman como referencia programas o legislación nacionales, mientras que en otros, se opta por programas reconocidos por la comunidad internacional. También cabe destacar que integrar el uso de SIG puede ser muy útil, especialmente en estos casos en los que la evaluación tiene un enfoque urbano. Por otro lado, la mayoría de métodos revisados se basan en un enfoque *bottom-up*, y el motivo reside en que, aunque este conlleva un mayor tiempo y esfuerzo de definición, permite modelar con precisión las características del parque edificado, determinar el desglose de usos finales de la energía e incorporar el comportamiento de los ocupantes de los edificios y de efectos macroeconómicos y socioeconómicos. Tras analizar una muestra representativa de edificios, las conclusiones de dicha muestra pueden ser extrapoladas a la totalidad del parque edificatorio, otorgando un enfoque urbano a la metodología.

Por último, en relación a la simulación energética de edificios, se han analizado las dos posibles vertientes, simulación en régimen estacionario o simulación dinámica, concluyendo que esta última

permite obtener resultados más precisos y con un mayor nivel de detalle. También se describen los parámetros de cálculo que deben ser tenidos en cuenta a la hora de llevar a cabo una simulación dinámica de un edificio y se analizan las herramientas existentes en el mercado, aportando una comparativa de las capacidades que ofrece cada una de ellas, lo que permite seleccionar la herramienta adecuada según el objetivo final que se persiga con la evaluación energética.

En resumen, las conclusiones del capítulo son las que se relacionan a continuación. Estas servirán como apoyo para establecer los requisitos de la metodología de evaluación energética a proponer en esta tesis.

- Las herramientas de evaluación de la sostenibilidad urbana deben ser adaptables al contexto físico, económico, social, etc. donde se apliquen.
- Para realizar la evaluación energética de un parque edificatorio, el enfoque adecuado es el *bottom-up*, el cual parte del análisis pormenorizado de una selección de edificios representativos para extrapolar, posteriormente, los resultados a escala urbana.
- Una metodología o modelo de evaluación energética debe contener variables que permitan cuantificar determinados aspectos del comportamiento energético del parque edificado.
- El método de cálculo más apropiado para llevar a cabo un análisis energético es la simulación dinámica.
- Una metodología o modelo de evaluación energética debe tener un sistema de agregación para extrapolar los resultados de la escala edificio a la escala de ciudad, o viceversa.
- El entorno SIG resulta una herramienta útil para tratar información urbana.

2.7 REFERENCIAS

- AEN/CTN 81, 2006. UNE-EN ISO 7730:2006. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local. España.
- Agencia de Ecología Urbana de Barcelona, 2007. Plan Especial de Indicadores de Sostenibilidad Ambiental de la Actividad Urbanística de Sevilla. Sevilla.
- Aksoezen, M., Daniel, M., Hassler, U., Kohler, N., 2015. Building age as an indicator for energy consumption. *Energy Build.* 87, 74-86. doi:10.1016/j.enbuild.2014.10.074
- Ascione, F., De Masi, R.F., de Rossi, F., Fistola, R., Sasso, M., Vanoli, G.P., 2013. Analysis and diagnosis of the energy performance of buildings and districts: Methodology, validation and development of Urban Energy Maps. *Cities* 35, 270-283. doi:10.1016/j.cities.2013.04.012
- ATECYR, 2008. Guía técnica. Procedimientos y aspectos de la simulación de instalaciones térmicas en edificios. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), Madrid.
- ATECYR, Universidad Politécnica de Valencia, 2011. CERMA Programa informático simplificado según el método abreviado para la calificación de eficiencia energética de edificios residenciales.
- Ayuntamiento de Bilbao, 2008. Indicadores de sostenibilidad de Bilbao 2008.

- Balaras, C.A., Dascalaki, E.G., Droutsas, K.G., Kontoyiannidis, S., 2016. Empirical assessment of calculated and actual heating energy use in Hellenic residential buildings. *Appl. Energy* 164, 115-132. doi:10.1016/j.apenergy.2015.11.027
- Balaras, C.A., Gaglia, A.G., Georgopoulou, E., Mirasgedis, S., Sarafidis, Y., Lalas, D.P., 2007. European residential buildings and empirical assessment of the Hellenic building stock, energy consumption, emissions and potential energy savings. *Build. Environ.* 42, 1298-1314. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.11.001
- Beattie, K.H., Ward, I.C., 1999. The advantages of building simulation for building design engineers, en: Nakahara, N., Yoshida, H., Udagawa, M., Hensen, J. (Eds.), Sixth International IBPSA Conference. Organizing Committee of Building Simulation '99, Kyoto, pp. 1079-1084.
- Blum, A., 2007. HQE2R-research and demonstration for assessing sustainable neighborhood development, en: Deakin, M., Mitchell, G., Nijkamp, P., Vreeker, R. (Eds.), Sustainable urban development volume 2: the environmental assessment methods. New York, pp. 412-428.
- Boardman, B., 2007. Examining the carbon agenda via the 40% House scenario. *Build. Res. Inf.* 35, 363-378. doi:10.1080/09613210701238276
- Bourdic, L., Salat, S., Nowacki, C., 2012. Assessing cities: a new system of cross-scale spatial indicators. *Build. Res. Inf.* 40, 592-605. doi:10.1080/09613218.2012.703488
- BRE, 2005. The Government's Standard Assessment Procedure for Energy Rating of Dwellings.
- BRE Global, 2016. BREEAM web page [WWW Document]. URL <http://www.breeam.org/page.jsp?id=346> (accedido 5.15.15).
- BRE Global, 2011. SD5065 technical guidance manual: version 1. BREEAM for Communities assessor manual: development planning application stage.
- Brundtland, G.H., 1987. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. Oslo.
- Bulkeley, H., 2010. Cities and the Governing of Climate Change. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 35, 229-253. doi:10.1146/annurev-environ-072809-101747
- Caputo, P., Costa, G., Ferrari, S., 2013. A supporting method for defining energy strategies in the building sector at urban scale. *Spec. Sect. Long Run Transitions to Sustain. Econ. Struct. Eur. Union Beyond* 55, 261-270. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.12.006
- Castanheira, G., Bragança, L., 2014. The evolution of the sustainability assessment tool SBToolPT: from buildings to the built environment. *ScientificWorldJournal*. 2014, (2356-6140), 62 (4), p. 1. doi:10.1155/2014/491791
- CENER, EFINOVATIC, 2012. CE3X Programa informático para la calificación de eficiencia energética de edificios residenciales y terciarios.
- Charlot-Valdieu, C., Outrequin, P., 2005. Des indicateurs de développement Durable pour l'évaluation des Projets de renouvellement urbain: Le modele INDI - RU 2005.
- Cheng, V., Steemers, K., 2011. Modelling domestic energy consumption at district scale: A tool to support national and local energy policies. *Environ. Model. Softw.* 26, 1186-1198. doi:10.1016/j.envsoft.2011.04.005
- Chrysoulakis, N., Lopes, M., San José, R., Grimmond, C.S.B., Jones, M.B., Magliulo, V., Klostermann, J.E.M., Synnefa, A., Mitraka, Z., Castro, E. a., González, A., Vogt, R., Vesala, T., Spano, D., Pigeon, G., Freer-Smith, P., Staszewski, T., Hodges, N., Mills, G., Cartalis, C., 2013. Sustainable

- urban metabolism as a link between bio-physical sciences and urban planning: The BRIDGE project. *Landsc. Urban Plan.* 112, 100-117. doi:10.1016/j.landurbplan.2012.12.005
- Comisión Europea, 2012. Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética, por la que se modifican las Directivas 2009/125/CE y 2010/30/CE, y por la que se derogan las Directivas 2004/8/CE y 2006/32/CE. Comunidad Europea.
- Comisión Europea, 2010. Directiva 2010/31/UE del parlamento Europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios. Comunidad Europea.
- Comisión Europea, 2009. Directiva 2009/125/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de octubre de 2009 por la que se insta un marco para el establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos relacionados con la energía. Comunidad Europea.
- Comisión Europea, 2006. Directiva 2006/32/CE del parlamento y del Consejo de 5 de abril de 2006 sobre la eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos y por la que se deroga la Directiva 93/76/CEE del Consejo. Comunidad Europea.
- Comisión Europea, 2004. Directiva 2004/8/CE del parlamento y del Consejo de 11 de febrero de 2004 relativa al fomento de la cogeneración sobre la base de la demanda de calor útil en el mercado interior de la energía y por la que se modifica la Directiva 92/42/CEE. Comunidad Europea.
- Comisión Europea, 2002. Directiva 2002/91/CE del parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2002 relativa a la eficiencia energética de los edificios. Comunidad Europea.
- Comisión Europea, 1993. Directiva 93/76/CEE del Consejo, de 13 de septiembre de 1993, relativa a la limitación de las emisiones de dióxido de carbono mediante la mejora de la eficacia energética (SAVE). Comunidad Europea.
- Crawley, D.B., Lawrie, L.K., Winkelmann, F.C., Buhl, W.F., Huang, Y.J., Pedersen, C.O., Strand, R.K., Liesen, R.J., Fisher, D.E., Witte, M.J., Glazer, J., 2001. EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. *Energy Build.* 33, 319-331. doi:10.1016/S0378-7788(00)00114-6
- CSTB, 2016. IISiBat Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.
- CTE, 2013. Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, por la que se actualiza el Documento Básico DB-HE Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación, aprobado por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo. España.
- CTE, 2006. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. España.
- Dall'O', G., Galante, A., Torri, M., 2012. A methodology for the energy performance classification of residential building stock on an urban scale. *Energy Build.* 48, 211-219. doi:10.1016/j.enbuild.2012.01.034
- Daly, G., González, A., 2013. Key indicators for territorial cohesion and spatial planning: The reform of EU cohesion policy and the new role of spatial indicators. *Borderl. J. Spat. Plan. Irel.* 77-89.
- Daly, G., González, A., Gleeson, J., McCarthy, E., Adams, N., Pinch, P., Burns, M.C., Johannesson, H., Sigurbjarnarson, V., Valtensbergs, V., Liviņa, A., 2013. KITCASP Key Indicators for Territorial Cohesion and Spatial Planning.
- Danish Building Research Institute, 2008. BSim Building Simulation programme.

- Dascalaki, E.G., Droutsas, K.G., Balaras, C.A., Kontoyiannidis, S., 2011. Building typologies as a tool for assessing the energy performance of residential buildings – A case study for the Hellenic building stock. *Energy Build.* 43, 3400-3409. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.002>
- DesignBuilder UK, 2015a. DesignBuilder help [WWW Document]. URL <http://www.designbuilder.co.uk/helpv3.4/> (accedido 12.12.15).
- DesignBuilder UK, 2015b. DesignBuilder software.
- Diefenbach, N., Loga, T., Stein, B., 2014. EPISCOPE. Energy Performance Indicators for Building Stocks 23.
- Diputación de Barcelona, 2009. Memoria de sostenibilidad. Los municipios: avanzando hacia escenarios más sostenibles. Barcelona.
- EarthCraft, 2014. Homepage of EarthCraft [WWW Document]. URL <http://earthcraft.org/communities>
- EIE TABULA Intelligent Energy, 2012. EIE TABULA Web Tool [WWW Document]. URL <http://www.episcope.eu/building-typology/> (accedido 3.3.15).
- EQUA, 1990. IDA-ICE Indoor Climate and Energy software.
- Estiri, H., 2014. Building and household X-factors and energy consumption at the residential sector. *Energy Econ.* 43, 178-184. doi:10.1016/j.eneco.2014.02.013
- European Commission, 2008. Communication from the Commission. Energy efficiency: delivering the 20% target. Brussels.
- European Project Partners, 2012. Project EIE TABULA-Intelligent Energy Europe [WWW Document]. URL <http://www.episcope.eu/building-typology/> (accedido 6.18.15).
- Fabbri, K., Zuppiroli, M., Ambrogio, K., 2012. Heritage buildings and energy performance: Mapping with GIS tools. *Energy Build.* 48, 137-145. doi:10.1016/j.enbuild.2012.01.018
- Farahbakhsh, H., Ugursal, V.I., Fung, A.S., 1998. A residential end-use energy consumption model for Canada. *Int. J. Energy Res.* 22, 1133-1143. doi:10.1002/(SICI)1099-114X(19981025)22:13<1133::AID-ER434>3.0.CO;2-E
- Firth, S.K., Lomas, K.J., Wright, a. J., 2010. Targeting household energy-efficiency measures using sensitivity analysis. *Build. Res. Inf.* 38, 25-41. doi:10.1080/09613210903236706
- Florio, P., Teissier, O., 2015. Estimation of the Energy Performance Certificate of a housing stock characterised via qualitative variables through a typology-based approach model: A fuel poverty evaluation tool. *Energy Build.* 89, 39-48. doi:10.1016/j.enbuild.2014.12.024
- Fonseca, J.A., Schlueter, A., 2015. Integrated model for characterization of spatiotemporal building energy consumption patterns in neighborhoods and city districts. *Appl. Energy* 142, 247-265. doi:10.1016/j.apenergy.2014.12.068
- Gaffron, P., Huismans, G., Skala, F., 2008. *Ecocity book II: how to make it happen*. Vienna.
- Gaffron, P., Huismans, G., Skala, F., 2005. *Ecocity book I: a better place to live*. Vienna.
- Garrido-Soriano, N., Rosas-Casals, M., Ivancic, A., Álvarez-del Castillo, M.D., 2012. Potential energy savings and economic impact of residential buildings under national and regional efficiency scenarios. A Catalan case study. *Energy Build.* 49, 119-125. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.030>

- Gil, J., Duarte, J.P., 2013. Tools for evaluating the sustainability of urban design: a review. *Proc. ICE - Urban Des. Plan.* 166, 311-325. doi:10.1680/udap.11.00048
- Gobierno de España, 2013. Ley 8/2013, de 26 de junio, de rehabilitación, regeneración y renovación urbanas. España.
- González, A., Donnelly, A., Jones, M., Chrysoulakis, N., Lopes, M., 2013. A decision-support system for sustainable urban metabolism in Europe. *Environ. Impact Assess. Rev.* 38, 109-119. doi:10.1016/j.eiar.2012.06.007
- Gouveia, J.P., Fortes, P., Seixas, J., 2012. Projections of energy services demand for residential buildings: Insights from a bottom-up methodology. *Energy* 47, 430-442. doi:10.1016/j.energy.2012.09.042
- Grupo de trabajo de Indicadores de Sostenibilidad de la Red de Redes de Desarrollo Local Sostenible, 2010. Sistema municipal de indicadores de sostenibilidad.
- GVA, 2009. Decreto 112/2009, de 31 de julio, del Consell, por el que regula las actuaciones en materia de certificación de eficiencia energética de edificios. Valencia.
- Haapio, A., 2012. Towards sustainable urban communities. *Environ. Impact Assess. Rev.* 32, 165-169. doi:10.1016/j.eiar.2011.08.002
- Haapio, A., Viitaniemi, P., 2008. A critical review of building environmental assessment tools. *Environ. Impact Assess. Rev.* 28, 469-482. doi:10.1016/j.eiar.2008.01.002
- Hens, H., Verbeeck, G., Verdonck, B., 2001. Impact of energy efficiency measures on the CO2 emissions in the residential sector, a large scale analysis. *Energy Build.* 33, 275-281.
- Huang, Y.J., Berkeley, L., 2000. A Bottom-Up Engineering Estimate of the Aggregate Heating and Cooling Loads of the Entire US Building Stock Prototypical Residential Buildings, en: *Proceedings of the 2000 ACEEE summer study on energy efficiency in buildings.* Pacific Grove, pp. 135-148.
- Huedo, P., López-Mesa, B., 2013. Revisión de herramientas de asistencia en la selección de soluciones constructivas sostenibles de edificación. *Inf. la Construcción* 65, 77-88. doi:10.3989/ic.11.048
- IBEC, 2007. CASBEE UD Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency for Urban Development. Technical manual 2007 edition.
- INE, 2011. Censos de Población y Viviendas 2011. Viviendas [WWW Document]. URL <http://www.ine.es/> (accedido 2.22.16).
- Instituto Valenciano de la Edificación, 2014. TABULA. Catálogo de tipología edificatoria residencial en España. Valencia.
- Johnston, D., Lowe, R., Bell, M., 2005. An exploration of the technical feasibility of achieving CO2 emission reductions in excess of 60% within the UK housing stock by the year 2050. *Energy Policy* 33, 1643-1659. doi:10.1016/j.enpol.2004.02.003
- Jones, P., Patterson, J., Lannon, S., 2007. Modelling the built environment at an urban scale—Energy and health impacts in relation to housing. *Landsc. Urban Plan.* 83, 39-49. doi:10.1016/j.landurbplan.2007.05.015
- Kavgic, M., Mavrogiani, a., Mumovic, D., Summerfield, a., Stevanovic, Z., Djurovic-Petrovic, M., 2010. A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector. *Build. Environ.* 45, 1683-1697. doi:10.1016/j.buildenv.2010.01.021

- Košir, M., Capeluto, I.G., Krainer, A., Kristl, Ž., 2014. Solar potential in existing urban layouts—Critical overview of the existing building stock in Slovenian context. *Energy Policy* 69, 443-456. doi:10.1016/j.enpol.2014.01.045
- Loga, T., Diefenbach, N., Stein, B., Balaras, C.A., Villatoro, O., Wittchen, K.B., 2012. Typology Approach for Building Stock Energy Assessment . Main Results of the TABULA project. Darmstadt.
- Luederitz, C., Lang, D.J., Von Wehrden, H., 2013. A systematic review of guiding principles for sustainable urban neighborhood development. *Landsc. Urban Plan.* 118, 40-52. doi:10.1016/j.landurbplan.2013.06.002
- Macías, M., García Navarro, J., 2010. Metodología y herramienta VERDE para la evaluación de la sostenibilidad en edificios. *Inf. la Construcción* 62, 87-100. doi:10.3989/ic.08.056
- Martins, T.A.L., Adolphe, L., Bastos, L.E.G., 2014. From solar constraints to urban design opportunities: Optimization of built form typologies in a Brazilian tropical city. *Energy Build.* 76, 43-56. doi:10.1016/j.enbuild.2014.02.056
- Mata, É., Kalagasidis, A.S., Johnsson, F., 2013. A modelling strategy for energy, carbon, and cost assessments of building stocks. *Energy Build.* 56, 100-108. doi:10.1016/j.enbuild.2012.09.037
- Mata, É., Sasic Kalagasidis, A., Johnsson, F., 2010. Modeling future energy use scenarios for building stocks – assessing methodology, en: *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI International Conference*. Florida, USA.
- Mauro, G.M., Hamdy, M., Vanoli, G.P., Bianco, N., Hensen, J.L.M., 2015. A new methodology for investigating the cost-optimality of energy retrofitting a building category. *Energy Build.* 107, 456-478. doi:10.1016/j.enbuild.2015.08.044
- Mercader-Moyano, P., Garrido-Piñero, J., Ramírez-de-Arellano, A., 2015. Environmental Impact Indicator System in Residential Neighbourhood Renovation, en: Mercader-Moyano, P. (Ed.), *The Sustainable Renovation of Buildings and Neighbourhoods*. doi:10.2174/97816810806421150101
- McKenna, R., Merkel, E., Fehrenbach, D., Mehne, S., Fichtner, W., 2013. Energy efficiency in the German residential sector: A bottom-up building-stock-model-based analysis in the context of energy-political targets. *Build. Environ.* 62, 77-88. doi:10.1016/j.buildenv.2013.01.002
- Ministerio de la Presidencia, 2013. Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios. España.
- Ministerio de la Presidencia, 2007a. Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios RITE. España.
- Ministerio de la Presidencia, 2007b. Real Decreto 47/2007, de 19 de enero, por el que se aprueba el Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción. España.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010. Sistema de indicadores y condicionantes para ciudades grandes y medianas.
- Ministerio de Vivienda del Gobierno de España, 2010. Libro Blanco de la Sostenibilidad en el Planeamiento Urbanístico Español. Madrid.
- Moffatt, S., 2001. Methods for the evaluation of the environmental performance of building stock. Editorial review by Illari Aho, Finland.

- Natarajan, S., Levermore, G.J., 2007. Predicting future UK housing stock and carbon emissions. *Energy Policy* 35, 5719-5727. doi:10.1016/j.enpol.2007.05.034
- NBE-CT-79, 1979. Real Decreto. Norma Básica de la Edificación sobre condiciones térmicas en los edificios. España.
- Nguyen, B.K., Altan, H., 2011. Comparative Review of Five Sustainable Rating Systems. *Procedia Eng.* 21, 376-386. doi:10.1016/j.proeng.2011.11.2029
- OECD, 2014. Organisation for Economic Co-operation and Development webpage [WWW Document]. URL <http://www.oecd.org> (accedido 10.15.14).
- Open Studio, 2016. Open Studio software.
- Penna, P., Prada, A., Cappelletti, F., Gasparella, A., 2015. Multi-objectives optimization of Energy Saving Measures in existing buildings. 49th AICARR Int. Conf. - Hist. Exist. Build. Des. retrofit 95, 57-69. doi:10.1016/j.enbuild.2014.11.003
- Ren, Z., Paevere, P., McNamara, C., 2012. A local-community-level, physically-based model of end-use energy consumption by Australian housing stock. *Energy Policy* 49, 586-596.
- Rubio del Val, 2015. Potencial del nuevo marco normativo para el impulso de la rehabilitación y la regeneración urbana en los ámbitos autonómico y local. *Inf. la Construcción* 67(EXTRA-1, 56-69. doi:<http://dx.doi.org/10.3989/ic.14.072>
- Salat, S., 2009. Energy loads, CO2 emissions and building stocks: morphologies, Typologies, Energy Systems and Behaviour. *Build. Res. Inf.* 37, 598-609. doi:10.1080/09613210903162126
- SCR, 2014. Homepage of sustainable community rating. [WWW Document]. URL <http://www.places.vic.gov.au/?c=VPPage&cid=1192185989323&pagename=Sustainability%2FLayout>
- Sharifi, A., Murayama, A., 2013. A critical review of seven selected neighborhood sustainability assessment tools. *Environ. Impact Assess. Rev.* 38, 73-87. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.eiar.2012.06.006>
- Shimoda, Y., Fujii, T., Morikawa, T., Mizuno, M., 2004. Residential end-use energy simulation at city scale. *Build. Environ.* 39, 959-967. doi:10.1016/j.buildenv.2004.01.020
- Shorrock, L., Dunster, J., 1997. The physically-based model BREHOMES and its use in deriving scenarios for the energy use and carbon dioxide emissions of the UK housing stock. *Energy Policy* 25, 1027-1037. doi:10.1016/S0301-4215(97)00130-4
- Snäkin, J.-P.A., 2000. An engineering model for heating energy and emission assessment The case of North Karelia, Finland. *Appl. Energy* 67, 353-381.
- Solé-Bonet, J., 2003. Aislamiento térmico en la edificación. Tarragona.
- Swan, L.G., Ugursal, V.I., 2009. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13, 1819-1835. doi:10.1016/j.rser.2008.09.033
- Terés-Zubiaga, J., Martín, K., Erkoreka, a., Sala, J.M., 2013. Field assessment of thermal behaviour of social housing apartments in Bilbao, Northern Spain. *Energy Build.* 67, 118-135. doi:10.1016/j.enbuild.2013.07.061
- Theodoridou, I., Karteris, M., Mallinis, G., Papadopoulos, A.M., Hegger, M., 2012. Assessment of retrofitting measures and solar systems' potential in urban areas using Geographical

- Information Systems: Application to a Mediterranean city. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16, 6239-6261. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.075>
- Theodoridou, I., Papadopoulos, A.M., Hegger, M., 2011a. A typological classification of the Greek residential building stock. *Energy Build.* 43, 2779-2787. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.036>
- Theodoridou, I., Papadopoulos, A.M., Hegger, M., 2011b. Statistical analysis of the Greek residential building stock. *Energy Build.* 43, 2422-2428. doi:10.1016/j.enbuild.2011.05.034
- Thermal Energy System Specialists, 1995. TRNSYS Transient System Simulation Tool.
- U.S. Department of Defense, 1970. BLAST software.
- U.S. Department of Energy, 2013. Energy Plus software.
- U.S. Department of Energy, 1970. DOE-2 software.
- Uihlein, A., Eder, P., 2010. Policy options towards an energy efficient residential building stock in the EU-27. *Energy Build.* 42, 791-798. doi:10.1016/j.enbuild.2009.11.016
- UN Sustainable Development, 1998. Indicators of sustainable development: Guidelines and methodologies.
- United Nations, 1995. Agenda 21 [WWW Document]. URL <http://web.archive.org/web/20090420073232/http://www.un.org/esa/sustdev/documents/agenda21/spanish/agenda21sptoc.htm> (accedido 9.5.14).
- Universidad de Sevilla, 2013. HULC Herramienta Unificada LIDER-CALENER.
- University of Glasgow, 1974. Esp-r software.
- US GBC, 2009. LEED ND Leadership in Energy and Environmental Design for neighborhood development.



3. SELECCIÓN DE VARIABLES PARA LA EVALUACIÓN ENERGÉTICA PASIVA

Propuesta **metodológica** para la caracterización del **comportamiento energético pasivo** del parque edificatorio **residencial** existente considerando su contexto **urbano**.

3.1 INTRODUCCIÓN

De las conclusiones presentadas en el Capítulo 2, se extrae la necesidad de definir unos indicadores para evaluar la sostenibilidad urbana que permitan llevar a cabo una valoración objetiva y transparente de los diferentes aspectos que la integran. En particular, este trabajo pretende abordar, dentro de la perspectiva ambiental, el aspecto energético, por lo que en el presente capítulo se lleva a cabo una selección de variables que serán empleadas para desarrollar la metodología propuesta en esta tesis.

Como se ha apuntado anteriormente, esta tesis propone una metodología de evaluación energética pasiva del parque edificatorio residencial existente para la que se tienen en cuenta los condicionantes de los edificios y también del entorno urbano en el que se encuentran. Por tanto, aporta un enfoque holístico, no centrándose únicamente en el edificio como elemento individual y aislado.

Tomando como punto de partida el análisis descriptivo de las HESU y de las metodologías de evaluación energética presentado en el Capítulo 2, en este capítulo se plantea identificar aquellos indicadores que permitan caracterizar el comportamiento energético pasivo del parque residencial existente de edificios y las variables que influyen en el mismo. Para ello, en primer lugar se lleva a cabo un análisis exhaustivo de los indicadores de sostenibilidad que, desde una perspectiva más amplia, permitirá identificar las variables que evalúan energéticamente al parque edificado. Y, en segundo lugar, se realiza un análisis en profundidad de las metodologías de evaluación energética, para identificar los aspectos considerados en ellas que afectan al comportamiento energético.

Con ello, se identificarán, por un lado, unos indicadores, considerados como variables dependientes o respuesta, que aportan información cuantificable y comparable sobre el comportamiento energético del parque edificatorio; y, por otro, unos factores, tanto a escala de edificio como a escala urbana, llamados variables independientes o covariables, que tengan una influencia significativa sobre dicho comportamiento.

Este conjunto de variables y covariables será integrado para desarrollar la metodología que se propone en el marco de esta tesis. Así pues, las variables respuesta constituirán los resultados del modelo, mientras que las covariables, de las cuales dependen las variables respuesta, constituirán la información de entrada.

La Figura 3.1 muestra la estructura de este capítulo y la información de partida para el desarrollo de cada una de las secciones que lo componen. El punto de partida son las conclusiones extraídas en el Capítulo 2.



Figura 3.1 Esquema del Capítulo 3

3.2 ANÁLISIS DE INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD URBANA PROPUESTOS POR LAS HESU

Este apartado pretende analizar cómo las HESU existentes en la literatura abordan el concepto de sostenibilidad urbana en sus tres dimensiones (ambiental, social y económica) y tiene como objetivo último identificar cómo es tratado el aspecto energético, como parte constituyente de la dimensión ambiental, lo que llevará a identificar unos indicadores energéticos para evaluar el comportamiento pasivo del parque edificatorio residencial existente. Para este cometido, se propone un marco común que permita la comparación entre todos los indicadores propuestos por las HESU. Así, los indicadores propuestos por cada HESU se integran y aglutinan según los diferentes aspectos que componen la sostenibilidad urbana.

La Figura 3.2 muestra el procedimiento empleado para proponer el marco común de comparación.

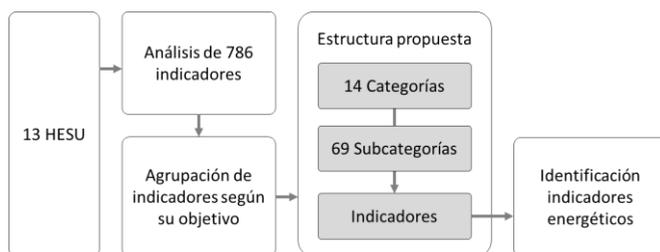


Figura 3.2 Metodología aplicada para proponer una estructura de indicadores

3.2.1 PROPUESTA DE ESTRUCTURA COMÚN DE CLASIFICACIÓN DE INDICADORES

Previamente a comparar los indicadores utilizados en cada herramienta, es necesario definir una estructura común homogénea, pues cada herramienta utiliza un sistema de clasificación y organización de indicadores diferente, también con distinta nomenclatura, que dificulta su comparación.

Algunos autores realizaron anteriormente un trabajo similar. Por ejemplo, Sharifi y Murayama (2013) propusieron las siguientes categorías: “recursos y medioambiente”, “transporte”, “social”, “económico”, “emplazamiento y selección de sitio”, “patrones y diseño”, “innovación”, subdividiendo cada categoría en criterios. Luederitz et al. (2013) establecieron en su trabajo 11 categorías relacionadas con los principios de la sostenibilidad: “funcionalidad”, “contexto”, “estructura”, “efectos externos”, “integridad del sistema socio-ecológico”, “subsistencia y oportunidad”, “equidad intra-generacional”, “equidad inter-generacional”, “eficiencia y mantenimiento de recursos”, “civismo socio-ecológico y gobernanza democrática” y “precaución y adaptación”. También Bourdic et al. (2012) propusieron un conjunto de indicadores que distribuyeron en una lista compuesta por 9 categorías específicamente desarrolladas para el contexto: “uso del suelo”, “movilidad”, “agua”, “biodiversidad”, “equidad”, “economía”, “residuos”, “cultura y bienestar”, “energía y bioclimatismo”.

Sin embargo, estas clasificaciones no permiten indagar con claridad en el aspecto energético, con el fin de identificar las variables que influyen en el comportamiento energético pasivo del parque edificatorio residencial. Tampoco se especifica en ninguno de estos trabajos el objetivo específico que persigue cada una de las categorías, es decir, la finalidad que se pretende alcanzar con su implementación en un entorno urbano. Así pues, con el fin de homogeneizar y poder posteriormente agrupar el total de 786 indicadores contenidos en las HESU, cuyo listado se recoge en el Anexo I Listado de indicadores de sostenibilidad urbana¹, se ha propuesto una nueva estructura en dos niveles de 14 categorías y 69 subcategorías, para las cuales se especifica el objetivo u objetivos perseguidos. Así pues, la nueva estructura lleva asociado al menos un objetivo a cada categoría, lo que permite, a posteriori, clasificar los indicadores contenidos en las HESU no sólo dentro de la temática abordada, sino también atendiendo a su objetivo.

La Tabla 3.1 presenta la estructura propuesta en la que posteriormente se agrupan los indicadores para ser comparados. Las 14 categorías definidas en esta clasificación son el resultado de un profundo análisis y abordan todos los aspectos tratados por los indicadores. Cada una de las categorías está, a su vez, dividida en subcategorías, y cada una de ellas persigue, al menos, un objetivo.

¹ En el Anexo I Listado de indicadores de sostenibilidad urbana se recoge la relación exhaustiva de indicadores contenidos en cada una de las 13 HESU analizadas.

Tabla 3.1 Estructura en dos niveles de categorías y subcategorías

Categoría	Subcategoría	Objetivo
Sitio y suelo	Condiciones climáticas y del lugar	Aprovechar las condiciones óptimas (topografía, vientos predominantes, soleamiento)
	Ocupación de suelo	Fomentar el uso eficiente del suelo
	Reutilización y conservación del suelo y el patrimonio	Fomentar la reutilización de suelo existente y edificios abandonados
	Compacidad	Ciudad compacta versus ciudad dispersa (Rueda, 2007) Promover edificios plurifamiliares entre medianeras frente a viviendas unifamiliares aisladas (Ghosh y Vale, 2009)
Morfología urbana	Diseño y calidad del espacio público	Asegurar el diseño adecuado de la ciudad
	Usos mixtos	Estimular los edificios de usos mixtos (residencial, comercial, etc.)
	Equipamiento	Proveer al barrio de centros educativos, centros sanitarios, actividades comerciales, etc.
	Diseño universal y barreras arquitectónicas	Asegurar que los elementos urbanos son utilizables por todos, incluso por personas con diversidad funcional
	Espacio para aparcamiento	Reducir los espacios de aparcamiento para vehículo privado
	Seguridad, salubridad e higiene	Eliminar riesgos y asegurar la seguridad pública
Movilidad y transporte	Reducción de distancias y del uso del vehículo privado	Fomentar la ciudad compacta, reducir tiempos de desplazamiento (Zhao et al., 2014) y mejorar las rutas a pie
	Transporte público y otras alternativas sostenibles	Fomentar el uso del transporte público y la bicicleta y mejorar las conexiones
	Eficiencia en el transporte público	Uso eficiente de la energía y promover formas urbanas compactas (Byrd y Ho, 2012)
	Gestión del transporte	Mejorar los sistemas logísticos y proporcionar información al ciudadano sobre movilidad
Naturaleza y biodiversidad	Zonas verdes	Proveer el barrio de zonas verdes y corredores de vegetación
	Huertos urbanos	Integrar la agricultura ecológica para el autoconsumo y venta sin intermediarios.
	Recursos naturales	Prevenir la destrucción de los hábitats naturales de flora y fauna
	Biodiversidad de especies	Conservar la biodiversidad
	Elementos arquitectónicos con vegetación	Incluir la vegetación en cubiertas y fachadas de edificios
Edificación y vivienda	Cumplimiento de estándares y legislación	Promocionar el uso de sellos de certificación ambiental en edificios
	Rehabilitación de edificios y adaptación de uso	Promover la rehabilitación energética de edificios existentes y la adaptación de uso
	Eficiencia en los recursos del edificio	Controlar el uso adecuado de los recursos en las viviendas
	Demanda energética en el edificio	Diseñar edificios con alta eficiencia energética para reducir su demanda energética (Okeil, 2010)
	Diseño bioclimático del edificio	Acondicionar los edificios con sistemas naturales aprovechando las condiciones microclimáticas favorables (soleamiento, ventilación natural e iluminación)
	Diversidad de viviendas	Asegurar la diversidad de viviendas según el estatus de sus ocupantes y el tamaño familiar
	Mantenimiento de edificios	Reducir la necesidad de mantenimiento de edificios

Tabla 3.1 Estructura en dos niveles de categorías y subcategorías (continuación)

Categoría	Subcategoría	Objetivo
Energía	Soleamiento y sombras	Mitigar las obstrucciones solares en invierno y proporcionar protección y vegetación en verano.
	Diseño bioclimático urbano	Acondicionar los espacios urbanos con sistemas naturales aprovechando las condiciones microclimáticas favorables (soleamiento, ventilación natural e iluminación)
	Isla de calor	Mitigar el efecto isla de calor en las ciudades
	Eficiencia energética de las instalaciones y monitorización	Mejorar la eficiencia energética (calefacción y refrigeración a nivel de distrito, plantas de cogeneración, etc.)
	Energías renovables	Implementar energías renovables para promover la autosuficiencia energética
	Suministro de energía	Asegurar el suministro de energía e incentivar la producción local de energía para limitar la dependencia energética exterior
	Consumo energético	Cuantificar el consumo energético
Agua	Consumo de agua	Reducir el consumo de agua a través de dispositivos de ahorro en los aparatos sanitarios Evitar pérdidas en las redes de distribución Mejorar la autosuficiencia de agua
	Gestión del agua de lluvia y residual	Reutilización de agua de lluvia para riego, hacer la colada, lavar el coche e inodoros
	Calidad del agua	Evitar la contaminación del agua y la infiltración de aguas contaminadas
Materiales	Materiales de bajo impacto	Utilizar materiales con bajo impacto ambiental durante su ciclo de vida (manufacturación, implementación y demolición) Utilizar materiales con alta durabilidad y que sean inventariables
	Productos con distintivo ambiental	Utilizar materiales con distintivo de calidad ambiental que proporcione información fiable
	Materiales reutilizados y reciclados	Minimizar el uso de materiales y promocionar el uso de materiales reutilizados y reciclados
	Materiales locales	Incentivar el uso de materiales locales para reducir el impacto producido por el transporte
Residuos	Minimización de residuos	Minimizar la producción de residuos
	Tratamiento de residuos	Tratar los residuos
Contaminación	Contaminación del suelo	Prevenir la contaminación del suelo
	Contaminación del aire	Prevenir la contaminación del aire y asegurar su calidad
	Contaminación del agua	Prevenir la contaminación del agua y asegurar su calidad
	Contaminación acústica	Prevenir la contaminación acústica
	Contaminación lumínica	Prevenir la contaminación luminosa
	Contaminación de recursos y otros	Prevenir la contaminación de recursos
Aspecto social	Cohesión social y barrios mixtos	Fomentar la población mixta de diferentes edades, origen y poder adquisitivo, para evitar el riesgo de pobreza y exclusión social
	Participación ciudadana	Considerar las autoridades locales los puntos de vista de los ciudadanos durante los procesos de toma de decisión Incrementar el nivel de satisfacción de la población
	Asociaciones cívicas	Promover la asociación y visibilidad de los ciudadanos
	Vivienda asequible	Posibilitar la vivienda asequible para los ciudadanos en todos los barrios de la ciudad a través de vivienda de protección oficial
	Pobreza energética	Luchar contra la pobreza energética
	Educación	Reducir el absentismo y la delincuencia en las escuelas

Tabla 3.1 Estructura en dos niveles de categorías y subcategorías (continuación)

Categoría	Subcategoría	Objetivo
Aspecto económico	Empleo local, social y verde	Contratar empleados locales con diferentes niveles de formación Crear empleo próximo a las zonas residenciales para reducir desplazamientos Fomentar el marketing de productos locales Fomentar intercambio económico con el mundo rural
	Tasa de empleo	Medir las tasas de empleo y desempleo
	Nuevos negocios e inversiones	Atraer nuevos negocios al barrio Fomentar nuevos negocios a través de la concesión de créditos Impulsar la economía local
	Calidad de empleo	Promover el buen funcionamiento de las pequeñas y medianas empresas (de uso mixto en el barrio) Proporcionar información a los ciudadanos y las empresas acerca de los negocios disponibles en el barrio Integrar actividades medioambientales en el municipio
	Turismo	Revitalizar el turismo
	Retorno de la inversión y costes asequibles	Evaluar la inversión y los beneficios que los negocios implican
	Gestión e institución	Gestión institucional
Gestión de procesos		Implementar sistemas de gestión ambiental (ISO 9001, ISO 14001) para mejorar la calidad de los procedimientos
Transparencia administrativa		Asegurar la transparencia administrativa en los procesos de toma de decisiones políticas
Gestión de la información y del conocimiento		Asegurar una buena información al ciudadano Elaborar informes que proporcionen datos objetivos Generar canales de comunicación entre las instituciones y los ciudadanos
Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC)		Incorporar las TIC y asegurar el acceso de los ciudadanos a las mismas
Inversión en actividades para la sociedad		Cuantificar el gasto municipal en actividades que revierten en la sociedad (acciones sobre el medio ambiente, la política social, la solidaridad y la cultura)
Educación ambiental		Aumentar la concienciación sobre temas como la energía y el consumo de agua, el uso de transporte y gestión de residuos
Legislación para mejorar la sostenibilidad		Implementar sistemas de incentivos que ayuden a regular los hábitos de los ciudadanos (tasas de aparcamiento con descuento para el uso del transporte público, subvenciones para la rehabilitación de edificios o impuestos para el estacionamiento en los centros urbanos)
Innovación	Innovación	Implementar soluciones innovadoras en diferentes aspectos urbanos

Desglosar las categorías no es tarea fácil, pues algunas guardan íntima relación entre ellas, y en algunos casos, persiguen objetivos similares. En la Tabla 3.2 se presenta el nivel de relación entre las 14 categorías, indicando si se trata de una relación fuerte, media o si, por el contrario, no guarda relación alguna.

Tabla 3.2 Análisis del nivel de relación entre las 14 categorías propuestas

Categoría	SS	MU	MT	NB	EV	E	A	M	R	C	AS	AE	GI	I
Sitio y suelo (SS)														
Morfología urbana (MU)	●●													
Movilidad y transporte (MT)	●●	●●												
Naturaleza y biodiversidad (NB)	●●	●	-											
Edificación y vivienda (EV)	●●	●●	-	●										
Energía (E)	●●	●●	●●	●	●●									
Agua (A)	●	-	-	●	●●	●								
Materiales (M)	●	-	●	●	●●	●	-							
Residuos (R)	●	-	-		●●	-	-	●						
Contaminación (C)	●	-	●	●	●●	●	●●	●	●					
Aspecto social (AS)	-	●	-	-	●	-	-	-	-	-				
Aspecto económico (AE)	-	●	-	-	-	-	-	-	-	-		●		
Gestión e institución (GI)	-	●	●	-	-	●	●	-	●	●	●●	●●		
Innovación (I)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

[●●] Relación fuerte; [●]Relación media; [-] Sin relación

Como se extrae de la Tabla 3.2, resultado del análisis de las tablas que listan los indicadores de las HESU (Anexo I), los aspectos que guardan una relación más íntima son “sitio y suelo” y “morfología urbana” debido a que el propio diseño de la ciudad da forma a muchos aspectos físicos, ambientales y socio-económicos. Por ejemplo, ambos determinan aspectos tan importantes como son la localización, el clima, el diseño urbano, la compacidad y la mixicidad de usos, entre otros.

La “movilidad y transporte” está también fuertemente relacionada con “la morfología urbana”, pues la estructura de la ciudad determina las distancias que la población debe recorrer para realizar sus actividades cotidianas, como ir a trabajar, al colegio o hacer la compra; factor que a su vez condiciona la accesibilidad (Gaffron et al., 2008). Los resultados del estudio realizado por Zhao et al. (2014) revelan la estrecha relación existente entre la compacidad de una ciudad y el tiempo que sus habitantes deben emplear en su movilidad diaria. Así, estos autores indican que altos ratios de urbanización sin un adecuado planeamiento urbano contribuyen a generar una compacidad pobre que, consecuentemente, desemboca en grandes tiempos de desplazamiento. La relación entre ambos aspectos es tan íntima que la herramienta SEV propone una única categoría que aúna los aspectos de morfología y transporte (“espacio público y movilidad”).

En relación con la categoría de “energía”, la estructura urbana determina la tipología de edificios que pueden construirse en una determinada área, marcada por el planeamiento urbano de la ciudad. Como destaca Okeil (2010), las tipologías edificatorias y la morfología urbana son aspectos muy significativos en el comportamiento energético de los edificios, en el uso de la electricidad (Wilson, 2013) y las emisiones de gases de efecto invernadero. Makido et al. (2012) demostraron en su estudio que los edificios compactos y altos muestran un mejor comportamiento energético a escala urbana que las viviendas unifamiliares aisladas.

En cuanto a la categoría “morfología urbana”, esta está también relacionada con factores socio-económicos, pues una alta compacidad urbana aproxima distancias entre los ciudadanos y promueve las relaciones entre ellos, lo que fomenta también la creación de asociaciones cívicas donde reunirse y fomentar la participación ciudadana. El uso mixto de los usos residencial y comercial en el mismo barrio, también atrae nuevos negocios en la zona, ayudando a promover la economía local.

Por lo que respecta a la categoría de “gestión e institución”, cabe decir que representa un factor clave para asegurar el funcionamiento eficaz de la sociedad. Una buena gestión y una transparencia administrativa real son necesarias para asegurar la objetividad en los procesos de diagnosis, toma de decisiones, promover nuevos planeamientos urbanos, a su vez que integrar la Agenda 21.

Finalmente, la “innovación” contribuye a evaluar la implementación de nuevas soluciones en los diferentes aspectos de la sostenibilidad urbana. Sin embargo, cabe apuntar que no se identifican relaciones específicas entre ella y otras categorías.

Establecido el marco común de comparación, los 786 indicadores, listados en el Anexo I, son agrupados según las categorías y subcategorías propuestas. A continuación, se muestra dicha agrupación en las tablas siguientes (Tabla 3.3 - Tabla 3.16).

Tabla 3.3 Clasificación de indicadores en la categoría “sitio y suelo”

Subcategorías	LEED ND	BREEAM Comm.	CASBEE UD	ECOCITY	IND+RU 2005	BRIDGE	KITCASP	LB	SMIS	CGYM	SEV	BCN	BIL
Condiciones climáticas y del lugar	LEED.5	BRE.1	CASBEE.5	ECO.13		BRDG.12	KIT.18	LB.2					
	LEED.6	BRE.2	CASBEE.6	ECO.14		BRDG.27		LB.57					
	LEED.11		CASBEE.25			BRDG.28							
						BRDG.10							
Ocupación de suelo		BRE.21	CASBEE.45			BRDG.11							
	LEED.1	BRE.18		ECO.19	INDI.17	BRDG.17	KIT.9		SMIS.1			BCN.1	
				ECO.30	INDI.26				SMIS.2				
				INDI.61					SMIS.3				
Reutilización y conservación de suelo y patrimonio													
	LEED.7	BRE.19	CASBEE.34	ECO.2	INDI.16	BRDG.18		LB.5				BCN.2	BIL.16
	LEED.41	BRE.20		ECO.26	INDI.20			LB.10					BIL.20
	LEED.42			ECO.27	INDI.58			LB.11					
LEED.43			ECO.29				LB.74						
Compacidad	LEED.16			ECO.28	INDI.14	BRDG.19		LB.8	SMIS.6	CGYM.1	SEV.1		
	LEED.19			ECO.31						CGYM.2	SEV.2		
				ECO.34									
				ECO.148									
				ECO.179									
			ECO.183										

Tabla 3.4 Clasificación de indicadores en la categoría “morfología urbana”

Subcategorías	LEED ND	BREEAM Comm.	CASBEE UD	ECOCITY	INDI-RU 2005	BRIDGE	KITCASP	LB	SMIS	CGYM	SEV	BCN	BIL
Diseño y calidad del espacio público	LEED.15	BRE.10	CASBEE.35	ECO.18	INDI.15			LB.4		CGYM.3	SEV.3		
	LEED.18	BRE.26	CASBEE.38	ECO.35	INDI.22			LB.16		CGYM.8	SEV.4		
	LEED.22	BRE.27	CASBEE.39	ECO.44	INDI.23			LB.18		CGYM.17	SEV.5		
	LEED.23	BRE.28		ECO.45	INDI.24			LB.19		CGYM.18	SEV.7		
		BRE.29		ECO.46	INDI.67					CGYM.23	SEV.14		
		BRE.30		ECO.48							SEV.16		
		BRE.31		ECO.49							SEV.6		
		BRE.45		ECO.50							SEV.40		
				ECO.56							SEV.41		
				ECO.76									
			ECO.100										
			ECO.139										
Usos mixtos	LEED.20			ECO.15	INDI.48			LB.7	SMIS.9	CGYM.20	SEV.20		
				ECO.16	INDI.60			LB.14	SMIS.8		SEV.19		
				ECO.36				LB.76			SEV.21		
				ECO.39				LB.80			SEV.23		
				ECO.41							SEV.42		
				ECO.42									
				ECO.43									
			ECO.78										
			ECO.167										
Equipamiento	LEED.26			ECO.37	INDI.31			LB.27		CGYM.50	SEV.22		BIL.18
	LEED.27			ECO.475	INDI.59			LB.77					
	LEED.28							LB.79					
Diseño universal y barreras arquitectónicas	LEED.28	BRE.47	CASBEE.32	ECO.47	INDI.27			LB.15		CGYM.7	SEV.18		
				ECO.75									
				ECO.86									
Espacio para aparcamiento	BRE.40			ECO.103				LB.43		CGYM.15	SEV.15		
	BRE.41			ECO.105				LB.41		CGYM.16			
Seguridad, salubridad e higiene	BRE.22		CASBEE.26	ECO.51	INDI.28								
			CASBEE.27	ECO.63	INDI.29								
			CASBEE.28	ECO.85	INDI.30								
					INDI.32								
					INDI.33								
				INDI.34									
				INDI.35									

Tabla 3.5 Clasificación de indicadores en la categoría “movilidad y transporte”

Subcategorías	LEED ND	BREEM Comm.	CASBEE UD	ECOCITY	INDI-RU 2005	BRIDGE	KITCASP	LB	SMIS	CGYM	SEV	BCN	BIL
Reducción de distancias y del uso del vehículo privado	LEED.8	BRE.32	CASBEE.24	ECO.40	INDI.49	BRDG.20	KIT.10	LB.28	SMIS.12	CGYM.10		BCN.9	BIL.8
	LEED.10	BRE.36	CASBEE.29	ECO.79	INDI.56	BRDG.22		LB.29	SMIS.34	CGYM.12			BIL.9
	LEED.24	BRE.39	CASBEE.30	ECO.80	INDI.62			LB.30		CGYM.13			
		BRE.42	CASBEE.31	ECO.81	INDI.64			LB.33		CGYM.21			
			CASBEE.65	ECO.87	INDI.65			LB.34		CGYM.51			
Transporte público y otras alternativas sostenibles	LEED.17	BRE.33		ECO.97				LB.35					
	LEED.9	BRE.34		ECO.98				LB.40					
		BRE.35		ECO.99				LB.42					
		BRE.37		ECO.102									
		BRE.38		ECO.164									
		BRE.43		ECO.165									
				ECO.17	INDI.63	BRDG.21	KIT.8	LB.36	SMIS.13	CGYM.11			BIL.5
				ECO.33	INDI.66	BRDG.23		LB.37	SMIS.14	CGYM.14			BIL.7
				ECO.82		BRDG.24		LB.38	SMIS.15				SEV.17
				ECO.83				LB.39					
Eficiencia en el transporte público	LEED.25	BRE.44		ECO.88									
				ECO.89									
				ECO.90									
				ECO.91									
				ECO.95									
Gestión del transporte		BRE.46	CASBEE.23	ECO.101									BIL.6
			CASBEE.66	ECO.92				LB.32	SMIS.10		SEV.11		BIL.10
			CASBEE.72	ECO.93					SMIS.11				
			CASBEE.79	ECO.94									
			CASBEE.80	ECO.107									
			ECO.109										
			ECO.110										
			ECO.113										

Tabla 3.6 Clasificación de indicadores en la categoría “naturaleza y biodiversidad”

Subcategorías	LEED ND	BREEAM Comm.	CASBEE UD	ECOCITY	INDI-RU 2005	BRIDGE	KITCASP	LB	SMIS	CGYM	SEV	BCN	BIL	
Zonas verdes	BRE.23		CASBEE.13	ECO.1	INDI.21		KIT.13	LB.3	SMIS.7	CGYM.9	SEV.34		BIL.13	
	BRE.54			ECO.3				LB.20		CGYM.25	SEV.35			
				ECO.6				LB.21		CGYM.26	SEV.36			
				ECO.7				LB.23		CGYM.27	SEV.33			
				ECO.52				LB.24		CGYM.29	SEV.37			
				ECO.58				LB.25		CGYM.30	SEV.38			
				ECO.134				LB.26				SEV.39		
				ECO.135										
		LEED.4		ECO.8					SMIS.39	CGYM.37		SEV.30		
		LEED.30		ECO.57										
Recursos naturales	LEED.12		CASBEE.12	ECO.4				LB.1		CGYM.24				
	LEED.13													
	LEED.14													
Biodiversidad de especies	LEED.2	BRE.51	CASBEE.11				KIT.19	LB.22	SMIS.38	CGYM.28			BIL.14	
		BRE.52	CASBEE.14											
		BRE.53												
Elementos arquitectónicos con vegetación				ECO.53										
				ECO.62										

Tabla 3.8 Clasificación de indicadores en la categoría “energía”

Subcategorías	LEED ND	BREEAM Comm.	CASBEE UD	ECOCITY	INDI-RU 2005	BRIDGE	KITCASP	LB	SMIS	CGYM	SEV	BCN	BIL
Soleamiento y sombras	LEED.31		CASBEE.17								SEV.8		
	LEED.46		CASBEE.53										
										CGYM.6	SEV.9		
Diseño bioclimático urbano			CASBEE.16	ECO.10	INDI.25	BRDG.3		LB.12					
			CASBEE.40	ECO.12		BRDG.9		LB.17					
			CASBEE.52	ECO.32		BRDG.5		LB.45					
				ECO.54		BRDG.6		LB.46					
				ECO.59		BRDG.7							
				ECO.60									
				ECO.61									
			ECO.114										
			ECO.115										
Isla de calor	LEED.45	BRE.4	CASBEE.1			BRDG.2							
			CASBEE.2										
			CASBEE.3										
Eficiencia energética de las instalaciones y monitorización	LEED.48	BRE.5	CASBEE.4	ECO.21	INDI.1			LB.47					
	LEED.49	BRE.8	CASBEE.18	ECO.116	INDI.3								
		BRE.11	CASBEE.19	ECO.124									
			CASBEE.43	ECO.125									
			CASBEE.68	ECO.126									
			CASBEE.69										
			CASBEE.71										
		CASBEE.81											
Energías renovables	LEED.47	BRE.6	CASBEE.67	ECO.9	INDI.7	BRDG.4	KIT.16	LB.48	SMIS.20	CGYM.32	SEV.25	BCN.10	BIL.4
		BRE.7		ECO.22						CGYM.33			
				ECO.127									
				ECO.128									
Suministro de energía			CASBEE.20					LB.49					
			CASBEE.21										
			CASBEE.22										
Consumo energético			CASBEE.75		INDI.5	BRDG.1		LB.44	SMIS.19	CGYM.31	SEV.44	BCN.7	BIL.3
					INDI.6					CGYM.52		BCN.8	

Tabla 3.9 Clasificación de indicadores en la categoría “agua”

Subcategorías	LEED ND	BREEAM Comm.	CASBEE UD	ECOCITY	INDI-RU 2005	BRIDGE	KITCASP	LB	SMIS	CGYM	SEV	BCN	BIL
Consumo de agua	LEED.40	BRE.9		ECO.130	INDI.9 INDI.10	BRDG.8		LB.50 LB.51	SMIS.16	CGYM.34 CGYM.36	SEV.26	BCN.12 BCN.13	BIL.1
Gestión del agua de lluvia y residual	LEED.44 LEED.50	BRE.3	CASBEE.56 CASBEE.57 CASBEE.58 CASBEE.59 CASBEE.60 CASBEE.61	ECO.131 ECO.132 ECO.133 ECO.136 ECO.140	INDI.11 INDI.12 INDI.13			LB.52 LB.53 LB.54 LB.55 LB.56 LB.65	SMIS.17 SMIS.18	CGYM.35			
Calidad del agua	LEED.3	BRE.16	CASBEE.8 CASBEE.9 CASBEE.10	ECO.55 ECO.137 ECO.138			KIT.20						BIL.2

Tabla 3.10 Clasificación de indicadores en la categoría “materiales”

Subcategorías	LEED ND	BREEAM Comm.	CASBEE UD	ECOCITY	INDI-RU 2005	BRIDGE	KITCASP	LB	SMIS	CGYM	SEV	BCN	BIL
Materiales de bajo impacto		BRE.12	CASBEE.41 CASBEE.42 CASBEE.74 CASBEE.77 CASBEE.70 CASBEE.78	ECO.70 ECO.152 ECO.154									
Productos con distintivo ambiental					INDI.18 INDI.19								
Materiales reutilizados y reciclados	LEED.51			ECO.71 ECO.112 ECO.147 ECO.149 ECO.150 ECO.151 ECO.155 ECO.156 ECO.157 ECO.158				LB.59 LB.60 LB.61			SEV.29		
Materiales locales		BRE.13 BRE.14	CASBEE.33	ECO.111				LB.58					

Tabla 3.11 Clasificación de indicadores en la categoría “residuos”

Subcategorías	LEED ND	BREEAM Comm.	CASBEE UD	ECOCTY	INDI-RU 2005	BRIDGE	KITCASP	LB	SMIS	CGYM	SEV	BCN	BIL
Minimización de residuos		BRE.15		ECO.145					SMIS.21		SEV.28	BCN.3	BIL.17
Tratamiento de residuos	LEED.52		CASBEE.62	ECO.23	INDI.42			LB.62	SMIS.22	CGYM.38	SEV.27	BCN.4	
			CASBEE.63	ECO.24	INDI.43			LB.63		CGYM.39	SEV.31	BCN.5	
			CASBEE.64	ECO.25				LB.64		CGYM.40		BCN.6	
				ECO.108				LB.66		CGYM.41			
				ECO.141				LB.67		CGYM.42			
			ECO.142				LB.68		CGYM.43				
			ECO.143				LB.69						
			ECO.144										
			ECO.146										

Tabla 3.12 Clasificación de indicadores en la categoría “contaminación”

Subcategorías	LEED ND	BREEAM Comm.	CASBEE UD	ECOCTY	INDI-RU 2005	BRIDGE	KITCASP	LB	SMIS	CGYM	SEV	BCN	BIL
Contaminación del suelo		BRE.17		ECO.65									
Contaminación del aire			CASBEE.7	ECO.66									
			CASBEE.44	ECO.66									
			CASBEE.15	ECO.64	INDI.38	BRDG.13	KIT.17		SMIS.23	CGYM.4		BCN.11	BIL.11
			CASBEE.48	ECO.5	INDI.8	BRDG.14			SMIS.24	CGYM.44			
Contaminación del agua			CASBEE.51	ECO.11	INDI.37	BRDG.15							
				ECO.67		BRDG.16							
Contaminación acústica			CASBEE.49	INDI.39					SMIS.25	CGYM.5	SEV.32		BIL.12
			CASBEE.50	INDI.40									
Contaminación luminosa	LEED.53		CASBEE.54	INDI.41						CGYM.45	SEV.10		
Contaminación de recursos y otros	LEED.36		CASBEE.46					LB.70					
			CASBEE.76										
			CASBEE.47										
			CASBEE.82										

Tabla 3.13 Clasificación de indicadores en la categoría “aspecto social”

Subcategorías	LEED ND	BREAM Comm.	CASBEE UD	ECOCITY	INDI-RU 2005	BRIDGE	KITCASP	LB	SMIS	CGYM	SEV	BCN	BIL
Cohesión social y barrios mixtos	LEED.21	BRE.24	CASBEE.36	ECO.77	INDI.44	BRDG.25	KIT.6	LB.73	SMIS.26	CGYM.46			BIL.25
				ECO.159	INDI.46		KIT.14		SMIS.27	CGYM.47			BIL.27
				ECO.160	INDI.73		KIT.15		SMIS.28	CGYM.48			BIL.30
				ECO.161					SMIS.29				BIL.31
Participación ciudadana	LEED.29	BRE.48	CASBEE.37	ECO.162	INDI.68			LB.85	SMIS.36				BIL.26
		BRE.49		ECO.163	INDI.69								BIL.33
					INDI.70								
Asociaciones cívicas				ECO.38				LB.71					
								LB.72					
Vivienda asequible		BRE.25		ECO.184		BRDG.26		LB.75		CGYM.49	SEV.43		BIL.19
				ECO.185									
				ECO.187									
				ECO.189									
Pobreza energética				ECO.186	INDI.4		KIT.12						
					INDI.53		KIT.11						
					INDI.54								
Educación					INDI.55								

Tabla 3.14 Clasificación de indicadores en la categoría “aspecto económico”

Subcategorías	LEED ND	BREEAM Comm.	CASBEE UD	ECOCITY	INDI-RU 2005	BRIDGE	KITCASP	LB	SMIS	CGYM	SEV	BCN	BIL	
Empleo local, social y verde	BRE.55			ECO.172	INDI.71			LB.6					BIL.21	
				ECO.173	INDI.72			LB.31						BIL.22
				ECO.174				LB.78						
Tasa de empleo	BRE.57			INDI.45			KIT.1		SMIS.30				BIL.23	
				INDI.47			KIT.2		SMIS.32					
				INDI.57					SMIS.33					
Nuevos negocios e inversiones	BRE.58			ECO.166			KIT.4							
				ECO.168										
Calidad de empleo	BRE.56			ECO.169			KIT.5							
				ECO.170										
Turismo				ECO.176									BIL.24	
				ECO.177										
				ECO.178										

Tabla 3.15 Clasificación de indicadores en la categoría “gestión e institución”

Subcategorías	LEED ND	BREEAM Comm.	CASBEE UD	ECOCITY	INDIRU 2005	BRIDGE	KITCASP	LB	SMIS	CGYM	SEV	BCN	BIL
Gestión institucional	LEED.56	BRE.50		ECO.180 ECO.181				LB.9 LB.83 LB.87					
Gestión de procesos	LEED.55		CASBEE.73										
Transparencia administrativa								LB.88 LB.89 LB.90 LB.91 LB.92 LB.93					
Gestión de la información y del conocimiento				ECO.171				LB.81 LB.82 LB.84		CGYM.19 CGYM.22	SEV.24		
Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC)									SMIS.35				
Inversión en actividades para la sociedad		BRE.59					KIT.3						BIL.15 BIL.28 BIL.29 BIL.32
Educación ambiental				ECO.96 ECO.104 ECO.20				LB.86					BIL.34

Tabla 3.16 Clasificación de indicadores en la categoría “innovación”

Subcategorías	LEED ND	BREEAM Comm.	CASBEE UD	ECOCITY	INDIRU 2005	BRIDGE	KITCASP	LB	SMIS	CGYM	SEV	BCN	BIL
Innovación	LEED.54	BRE.63											

3.2.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE INDICADORES CONTENIDOS EN LAS HESU

En esta sección se analizan los indicadores propuestos por las 13 HESU por categoría y subcategoría. Para poder determinar qué aspectos son en los que las herramientas hacen mayor y menor hincapié, se ha determinado el número de indicadores dedicados a cada subcategoría. Los resultados se muestran en la Figura 3.3. Mientras esta representa el número de indicadores que las 13 herramientas incluyen en las 14 categorías propuestas, la Figura 3.4 ahonda en las 69 subcategorías, mostrando de forma pormenorizada, el número de indicadores contenidos en cada una de ellas.

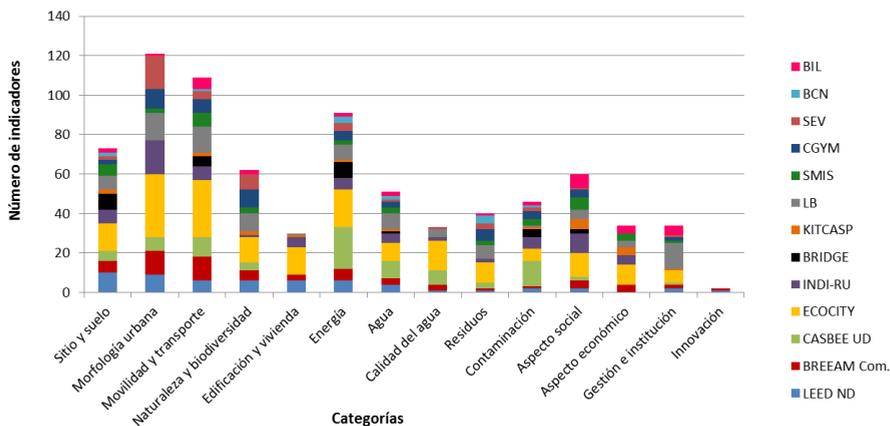


Figura 3.3 Número de indicadores que cada HESU analizada confiere a las 14 categorías propuestas en este trabajo

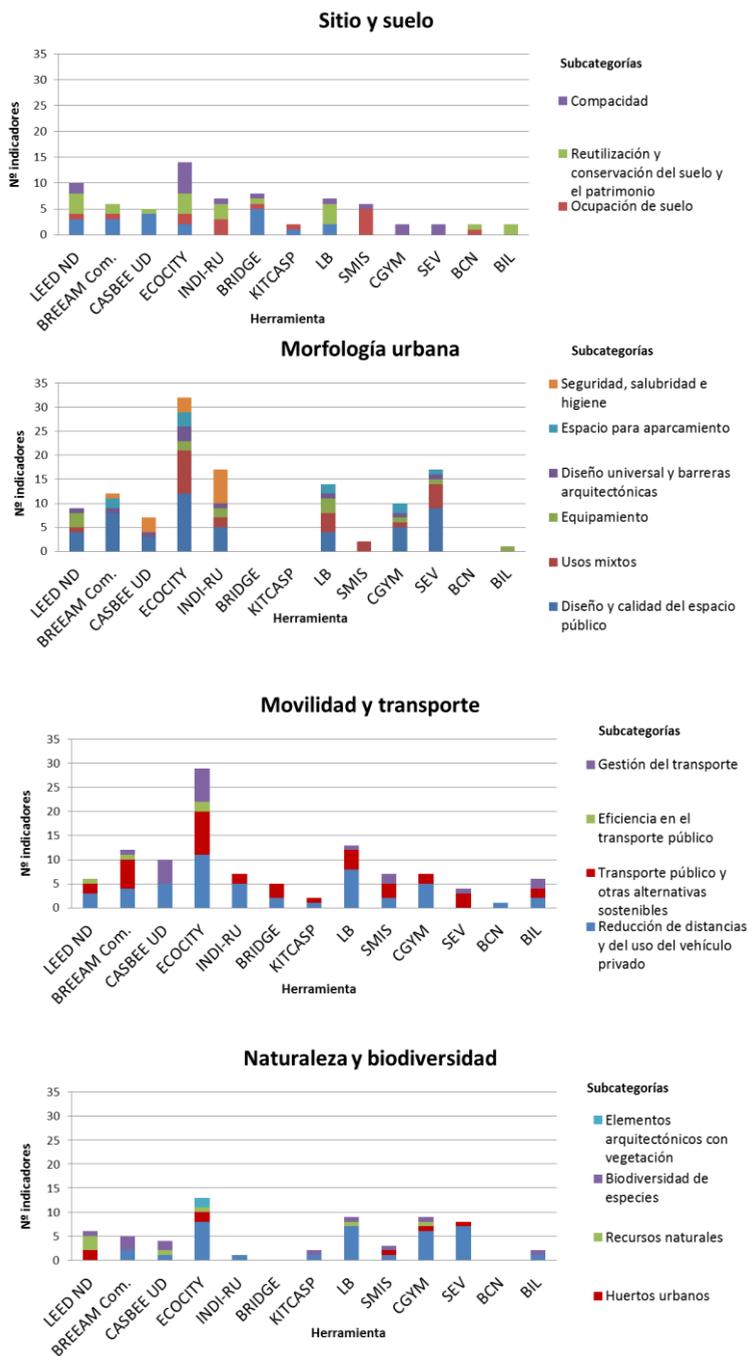


Figura 3.4 Número de indicadores de las 13 HESU analizadas contenidos en las 14 categorías

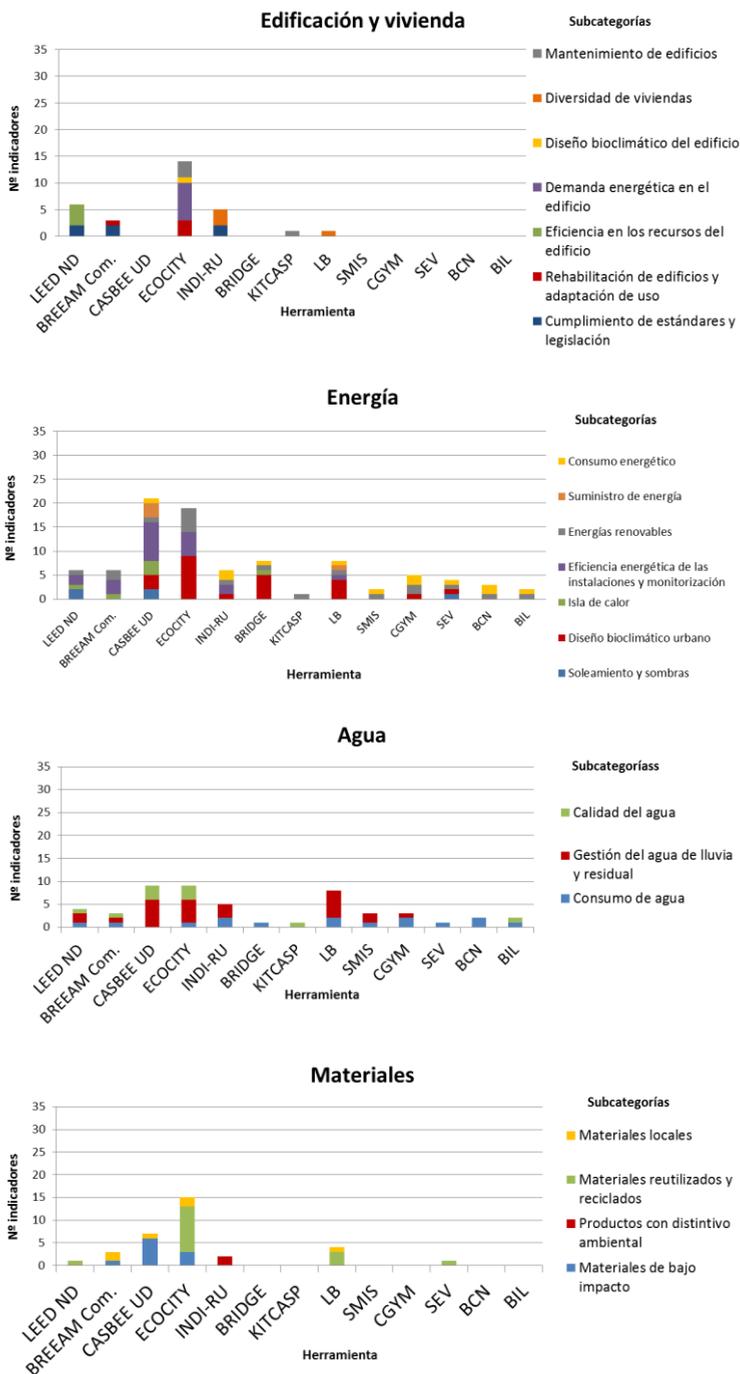


Figura 3.4 Número de indicadores de las 13 HESU analizadas contenidos en las 14 la categorías (continuación)

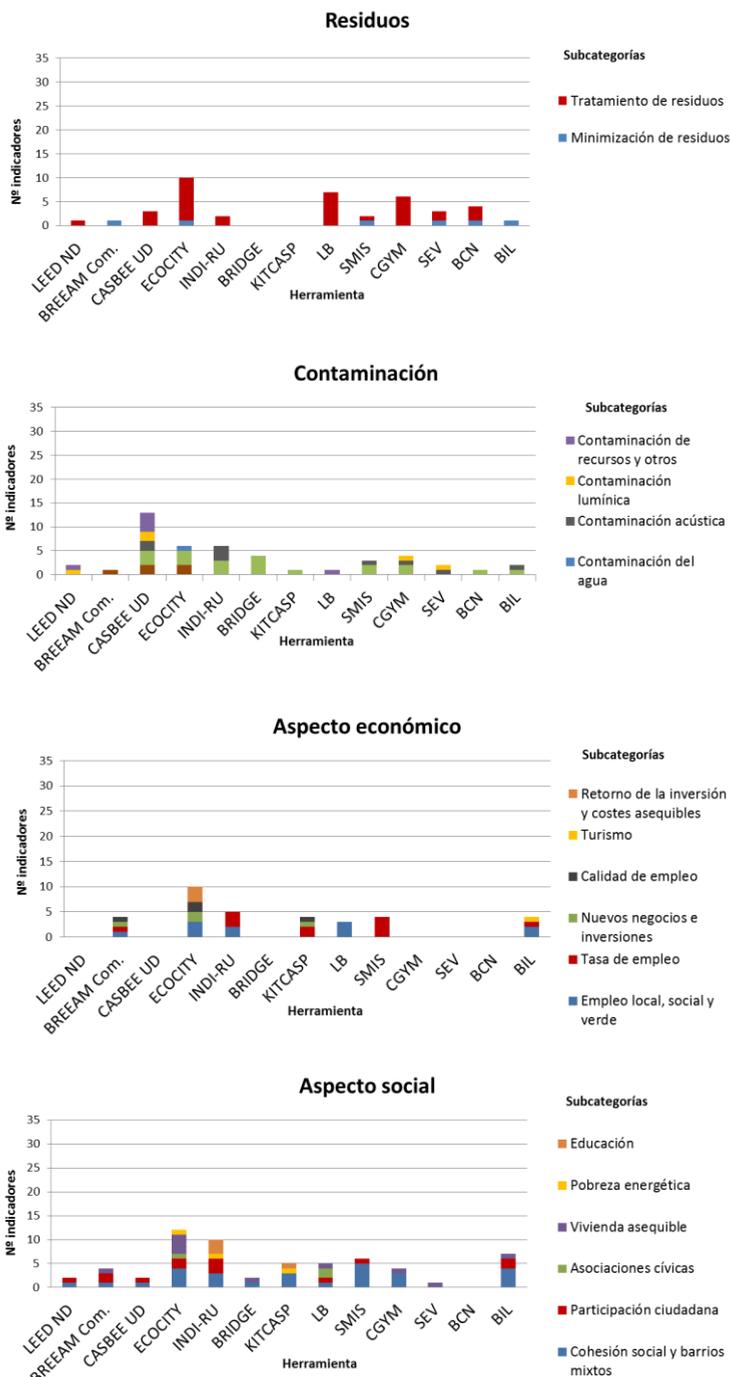


Figura 3.4 Número de indicadores de las 13 HESU analizadas contenidos en las 14 la categorías (continuación)

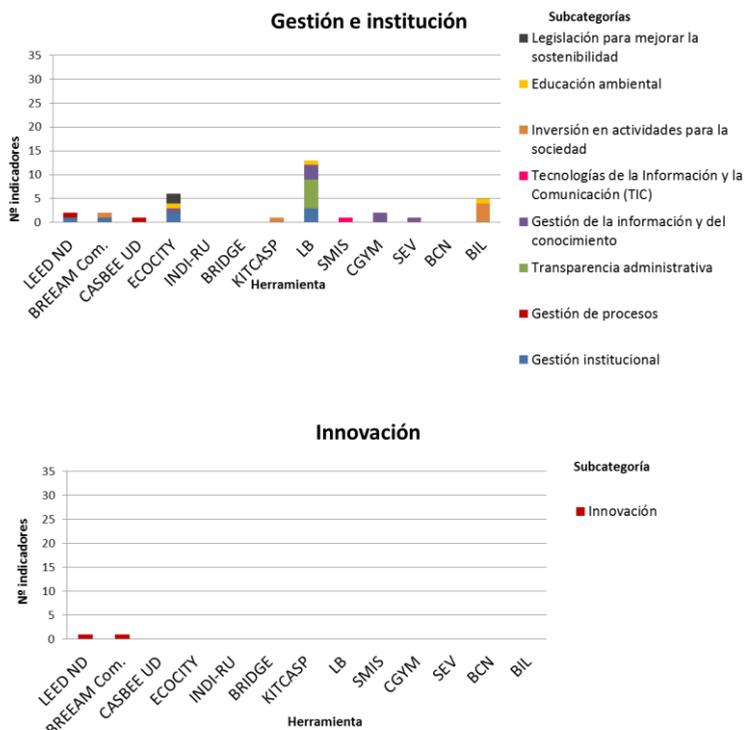


Figura 3.4 Número de indicadores de las 13 HESU analizadas contenidos en las 14 la categorías (continuación)

La Figura 3.5 muestra la distribución estadística de los datos en un diagrama de cajas y bigotes. El diagrama de cajas y bigotes permite identificar las categorías más y menos enfatizadas por el conjunto de las herramientas.

Los resultados evidencian el balance desequilibrado entre los pilares de la sostenibilidad: ambiental, social y económico. A los tres pilares clásicos de la sostenibilidad se incorpora, tal y como ya apuntaron Sharifi y Murayama (2013), el aspecto institucional, considerado como el cuarto pilar de la sostenibilidad. Sin embargo, como se refleja en la Figura 3.5, junto al aspecto económico todavía es uno de los aspectos menos tratados por las herramientas.

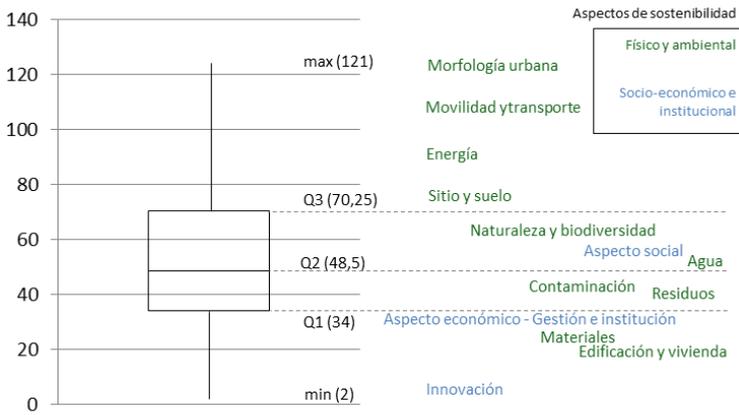


Figura 3.5 Distribución estadística del número de indicadores en las 14 categorías propuestas

Como se observa en el diagrama de cajas y bigotes de la Figura 3.5, las categorías de “morfología urbana”, “movilidad y transporte”, “energía”, y “sitio y suelo” son las más destacadas por las HESU, pues el número de indicadores contenidos en cada una de ellas (121, 109, 91 y 73, respectivamente) está por encima del tercer cuartil (70,25). Por ello, se puede decir que las herramientas generalmente otorgan más importancia a estas cuatro categorías que a las demás. En concreto, la categoría más tratada en general por el conjunto de herramientas es “morfología urbana”, que como se extrae de la Tabla 3.2. Esta es, además, la que guarda más relación con otras.

Aquellas categorías en las que el número de indicadores está alrededor de la mediana (o segundo cuartil, 48,5) son: “naturaleza y biodiversidad”, “aspecto social”, “agua”, “contaminación” y “residuos”. El número de indicadores de estas cinco categorías varía entre 40 y 62, rango ubicado en el centro de la distribución.

Las categorías que se encuentran por debajo del primer cuartil (34) representan los aspectos menos enfatizados por las herramientas, siendo estos: “aspecto económico”, “gestión e institución”, “materiales”, “edificación y vivienda” e “innovación”. Estas categorías llevan asociadas muy pocos indicadores; por ejemplo, en el caso de “innovación”, únicamente dos.

Los gráficos presentados en la Figura 3.4 proporcionan un análisis en profundidad de las subcategorías, ya que indican el número de indicadores que cada una de las herramientas confiere a las 69 subcategorías propuestas. Como se observa, la herramienta ECOCITY aborda tres de las categorías más destacadas (“morfología urbana”, “movilidad y transporte” y “energía”). Sin embargo, CASBEE UD es la herramienta que confiere más indicadores al aspecto “energía”. También merece la pena destacar que, SEV e INDI-RU, consideran la “morfología urbana” esencial para alcanzar la sostenibilidad, mientras que BCN, BRIDGE and KITCASP no conceden ningún indicador a este aspecto.

La subcategoría más abordada dentro de la categoría de “morfología urbana” es “diseño y calidad del espacio urbano”, pues 8 de las 13 herramientas la tratan en profundidad. La “mixticidad de usos” también destaca dentro de esta categoría. Por lo que respecta a la categoría “movilidad y transporte”, todas las herramientas a excepción de SEV, hacen grandes esfuerzos por integrar la subcategoría de “reducir distancias y el uso del vehículo privado” con el objetivo de acortar

distancias para los habitantes y mitigar el impacto ambiental negativo derivado del uso del transporte privado.

Diferencias menos marcadas se encuentran en la categoría de “sitio y suelo”, donde cada herramienta le confiere al menos 2 indicadores. Es importante apuntar que se aprecia una asociación clara entre este aspecto y la “morfología urbana”. La “compacidad” es el aspecto más destacado en “sitio y suelo” porque está presente en 8 de las herramientas (precisamente en aquellas europeas y españolas), pues junto con la “mixticidad de usos” representa una característica esencial de la ciudad mediterránea (Rueda, 2007).

La categoría “naturaleza y biodiversidad” es fuertemente considerada en las herramientas ECOCITY, LB, CGYM y SEV, y la subcategoría más tratada es la generación de “elementos arquitectónicos con vegetación” en los barrios y ciudades. La conservación de la “biodiversidad de especies” también es destacada por muchas herramientas, como en BREEAM *Communities* o en CASBEE UD.

A pesar de que el “aspecto social” es considerado por la mayoría de las herramientas analizadas, con la excepción de BCN, es importante destacar que generalmente está pobremente tratado, especialmente si se tiene en cuenta que es uno de los pilares fundamentales de la sostenibilidad. En esta categoría, la “cohesión social y barrios mixtos” es el punto más tratado, pues las 13 herramientas lo abordan. “Vivienda asequible” también destaca dentro del aspecto social y es considerado en 7 de las herramientas. Sin embargo, la “pobreza energética” es un tema muy poco abordado que, dada la situación actual de escasos recursos para afrontar los costes de la energía por las familias (Bouzarovski et al., 2011), requiere una mayor discusión por parte de las herramientas. Únicamente es considerado de forma muy superficial en ECOCITY, INDI-RU y KITCASP.

“Agua” y “contaminación” son tenidas en cuenta en las 13 herramientas, pero con límites. En cuanto a “agua”, la subcategorías más notable es “gestión de aguas pluviales y residuales”, mientras que 6 subcategorías son distinguidas en “contaminación”, incluyendo la contaminación de “suelo”, “agua”, la “lumínica”, de “recursos”, del “aire” y la “acústica”, donde las dos últimas son las más destacadas. En particular, BRIDGE es la herramienta que más destaca la subcategoría de “aire” debido a que integra los componentes del metabolismo urbano en la evaluación de impacto durante las intervenciones en el planeamiento urbano (González et al., 2013).

La categoría “residuos” también es abordada por todas las herramientas, especialmente la subcategoría de “tratamiento de residuos”, que está cobrando cada vez más importancia, también debido a la legislación que la impulsa (Parlamento Europeo, 2008).

Otro aspecto olvidado, al igual que el aspecto social e institucional, es el “aspecto económico”. LEED ND, CASBEE UD, BRIDGE, CGYM, SEV y BCN no lo contemplan, mientras que ECOCITY es la herramienta que lo aborda con más énfasis. La subcategoría más tratada es “empleo local, social y verde”, la cual promueve la comercialización de productos locales y el empleo relacionado con temas ambientales y sociales. Se puede concluir, pues, que el “aspecto económico” debería ser mucho más abordado, por constituir un pilar real de la sostenibilidad urbana.

La categoría de “materiales” se enfoca hacia el uso de materiales de bajo impacto ambiental y que son producidos en el ámbito local, y hacia la promoción de la reutilización y reciclaje de productos. Los materiales con sellos de certificación ambiental de producto (subcategoría “productos con distintivo ambiental”) también son premiados en esta categoría. Siete de las herramientas consideran las subcategorías de “productos con distintivo ambiental” y “materiales reutilizados y reciclados” como las más relevantes.

“Gestión e institución”, como se ha comentado, viene siendo un tema pobremente abordado ya que, a pesar de que 10 de las herramientas lo consideran, se le dedica un número muy bajo de indicadores. Como se apuntaba anteriormente, este es un tema importante al que se le debería de

conferir más relevancia, pues es un aspecto clave para establecer canales de comunicación y posibilitar la transparencia administrativa. La herramienta LB, siendo la que muestra más preocupación por este aspecto, asigna un rol más prominente a la “transparencia administrativa” mientras que BIL considera la “inversión en actividades para la sociedad” más importante. Esta categoría establece un desafío para las instituciones en cuanto a dirigir esfuerzos para el correcto funcionamiento de las ciudades.

Finalmente, “edificación y vivienda” es también un tema escasamente tratado, posiblemente porque existen ya herramientas específicas para la evaluación de la sostenibilidad de edificios a nivel individual.

Como se refleja en la Tabla 2.2 del Capítulo 2, sólo tres herramientas (LEED ND, BREEAM *Communities* y CASBEE UD) emplean un método de ponderación cuantitativo integrado en una escala de valoración por categorías y subcategorías. En consecuencia, el realizar una comparación objetiva que analice el peso conferido a cada una de las categorías solo es posible en el marco de estas tres herramientas. En el resto, los indicadores propuestos son meramente orientativos de manera que establecen directrices o recomendaciones que no son cuantificables ni integrables en una escala común de valoración. El análisis del peso conferido por estas tres herramientas a las 14 categorías se muestra en la Figura 3.6.

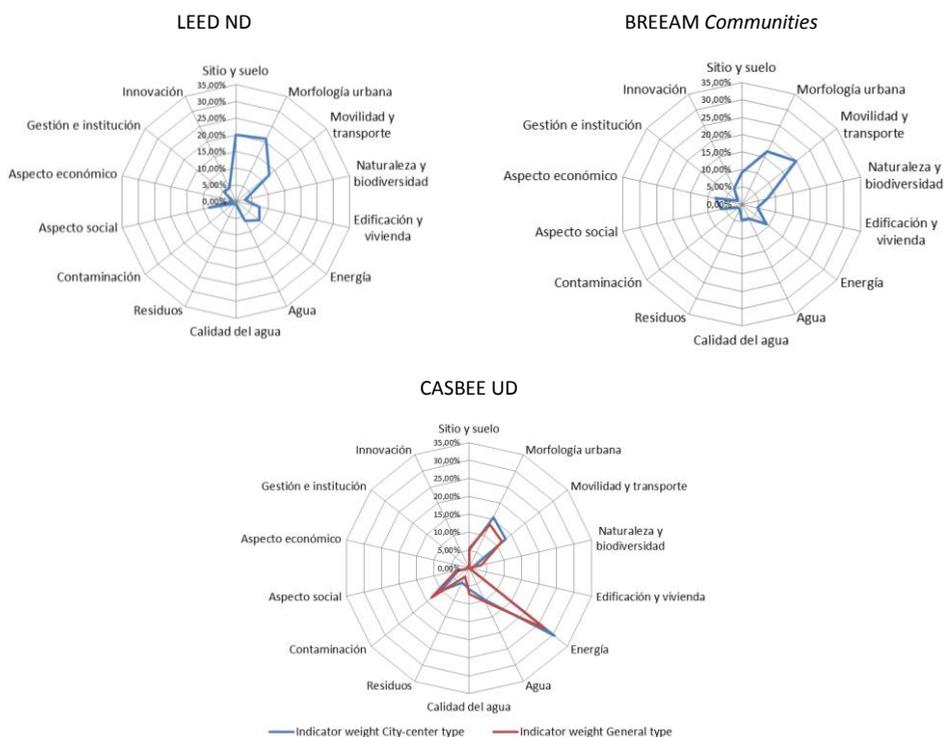


Figura 3.6 Distribución del porcentaje de pesos en las 14 categorías propuestas por las herramientas LEED ND, CASBEE UD y BREEAM *Communities*

Claramente, se observa que las tres herramientas ponen más énfasis en los aspectos ambientales y físicos (“sitio y suelo”, “morfología urbana”, “movilidad y transporte”, “naturaleza y biodiversidad”, “edificación y vivienda”, “energía”, “agua”, “materiales”, “residuos” y “contaminación” y dejan los aspectos socio-económicos e institucionales (“aspecto social”, “aspecto económico”, “gestión e institución” e “innovación”) más de lado. La Tabla 3.17 presenta dichos porcentajes de distribución de pesos en términos numéricos, de donde se extrae que LEED ND y BREEAM *Communities* ofrecen alrededor del 80% del peso al primer grupo y sólo el 20% al segundo. La diferencia en CASBEE UD es incluso mayor, siendo el 95% y el 5%, respectivamente.

Tabla 3.17 Comparación de la distribución del porcentaje de pesos en las herramientas LEED ND, CASBEE UD y BREEAM *Communities*

Aspecto	Categoría	LEED ND		BREEAM <i>Communities</i>		CASBEE UD	
		%	Total %	%	Total %	%	Total %
Aspectos físicos y ambientales	Sitio y suelo	20,00	81,82	9,18	79,59	5,50	94,90
	Morfología urbana	20,91		16,84		13,50	
	Movilidad y transporte	12,73		19,90		11,75	
	Naturaleza y biodiversidad	2,73		7,65		3,50	
	Naturaleza y biodiversidad	7,27		4,59		0,00	
	Energía	9,09		9,18		26,93	
	Agua	6,36		4,59		10,50	
	Materiales	0,91		4,59		7,23	
	Residuos	0,91		1,53		2,63	
	Contaminación	0,91		1,53		13,37	
Aspectos socio-económicos e institucionales	Aspecto social	8,18	18,18	6,12	20,41	4,15	5,10
	Aspecto económico	0,91		7,65		0,00	
	Gestión e institución	4,55		1,53		0,95	
	Innovación	4,55		5,10		0,00	

3.2.3 ANÁLISIS DEL INDICADOR ENERGÉTICO EN LAS HESU

En cuanto al aspecto que este trabajo aborda, “energía”, se puede decir que las herramientas analizadas lo tratan de una manera amplia, posicionándolo en el tercer lugar de los aspectos mayormente abordados. LEED ND y BREEAM *Communities* le otorgan alrededor del 9% de los indicadores, mientras que CASBEE UD casi un 27%. Ello denota la importancia que la energía tiene en el global de la sostenibilidad urbana. Llegados a este punto, la finalidad de realizar la revisión de indicadores radica en la necesidad de llevar a cabo una identificación de los indicadores energéticos existentes en la literatura para evaluar su adecuación en el presente estudio.

Puesto que este trabajo aborda la eficiencia energética desde la perspectiva pasiva, se analizan únicamente las subcategorías que incluyen indicadores o medidas pasivas encaminadas a mejorar el comportamiento energético en el entorno construido. La Tabla 3.18 diferencia las subcategorías del aspecto “energía” en aquellas que tratan aspectos pasivos y activos y, a su vez, indica a qué escala se hace referencia, si a la urbana o a la de edificio.

Tabla 3.18 Clasificación de las subcategorías del aspecto “energía”

	Escala urbana	Escala de edificio
Aspectos de diseño pasivo	Soleamiento y sombras Diseño bioclimático urbano Isla de calor	Demanda energética del edificio Diseño bioclimático del edificio
Aspectos de diseño activo	Eficiencia energética en instalaciones y monitorización Energía renovable Suministro de energía Consumo de energía	Eficiencia de los recursos en el edificio
Otros		Cumplimiento de estándares y normativa Rehabilitación de edificios y adaptación de uso Diversidad de viviendas Mantenimiento de edificios

Se seleccionan pues cinco subcategorías: “soleamiento y sombras”, “diseño bioclimático urbano”, “isla de calor”, “demanda energética del edificio” y “diseño bioclimático del edificio”. En la Tabla 3.19 se analizan en profundidad los indicadores que contienen estas cinco subcategorías, definiendo: la herramienta de la cual proceden, el tipo (cualitativo o cuantitativo) y los aspectos con los que están interrelacionados. Para aquellos indicadores cuantitativos, se indica una descripción del método de medición propuesto por la herramienta correspondiente. Los aspectos que se consideran relevantes en el contexto de esta tesis se señalan en la última columna de la Tabla 3.19. A partir de estos, se inicia el proceso de selección de variables y covariables para evaluar el comportamiento energético del parque residencial edificatorio.

Tabla 3.19 Indicadores relacionados con el aspecto “energía” que tienen en cuenta el comportamiento pasivo en la edificación y el urbanismo

Escala	Subcategoría	Indicador	Herramienta	Tipo		Tema relacionado					Considerado en la tesis			
				Cualitativo	Cuantitativo	Sitio y suelo	Morfología urbana	Movilidad y Transporte	Naturaleza y biodiversidad	Edificación y vivienda		Materiales		
Urbana	Diseño bioclimático urbano (DBU)	Indicador												
		LEED.31. <i>Tree-Lined and Shaded Streets</i> Recomienda disponer de árboles (pero no especifica cantidad ni recomendaciones según la orientación de la calle)	LEED ND		•				•				•	
		LEED.46. <i>Solar Orientation</i> Recomienda diseñar edificios con eje longitudinal Este-Oeste y orientarlos 15º con respecto a dicho eje	LEED ND		•	•							•	
		CASBEE.17. <i>Securing sunlight</i> Proveer al menos 2 o 4 horas de sol en el solsticio de invierno	CASBEE UD				•							
		CASBEE.53. <i>Mitigation of sunlight obstruction</i> No superar las horas de sombra establecidas en la legislación de Japón (no especifica el método de cálculo)	CASBEE UD				•							
		SEV.8. <i>Proyección vertical de sombra del arbolado en el espacio público.</i> Dotar de árboles por m ² de espacio público para alcanzar el confort térmico en el espacio exterior, según rangos propuestos	SEV									•		
		INDI.25 <i>Percentage of projects or constructed or renovated buildings that take into account the context and immediate environment (orientation, ventilation, insulation, shade, proximity to public transport, etc.)</i>	Le modele INDI-RU											•
		CASBEE.16. <i>Improving the wind environment</i> Medir los niveles óptimos de viento, mediante velocidad de viento y número de días con incidencia	CASBEE UD											
		CASBEE.40. <i>Planning of building group layout and forms to avoid blocking wind</i> Definir una morfología urbana y una orientación de los edificios óptima para el viento	CASBEE UD											
		CASBEE.52. <i>Mitigation of wind hazard</i> Reducir el riesgo de viento perjudicial, comparando los niveles pre y post edificaciones	CASBEE UD											
ECO.10. <i>Aprovechar (y preservar) los elementos paisajísticos y topográficos que puedan favorecer el clima urbano (por ejemplo, arboledas y bosques como fuentes de aire fresco, lagos como elementos de equilibrio climático, valles y laderas como corredores de viento) y evitar barreras en los corredores de viento.</i>	ECOCITY												•	
ECO.12. <i>Tener en cuenta las condiciones climáticas locales para el diseño de los espacios públicos (protección contra el viento, cubiertas para proteger de la lluvia, exposición solar, elementos de sombra) y de los edificios (forma, materiales, soluciones energéticas, etc.).</i>	ECOCITY												•	
ECO.32. <i>Analizar las variables que limitan la densidad, como el uso pasivo y activo de la energía solar, las condiciones de iluminación natural, la oferta suficiente de espacios abiertos, las superficies para la gestión hídrica y los corredores de ventilación.</i>	ECOCITY												•	

Tabla 3.19 Indicadores relacionados con el aspecto “energía” que tienen en cuenta el comportamiento pasivo en la edificación y el urbanismo (continuación)

Escala	Subcategoría	Indicador	Herramienta	Tipo		Tema relacionado					Considerado en la tesis			
				Cualitativo	Cuantitativo	Sito y suelo	Morfología urbana	Movilidad y transporte	Naturaleza y biodiversidad	Edificación y vivienda		Materiales		
U	DBU	<p>Indicador</p> <p>ECO.54. Crear, mantener o recuperar elementos vegetales y acuáticos en el interior de la ciudad (árboles, setos, superficies de césped, áreas cultivadas, cursos de agua, fuentes, etc.), especialmente los que ofrecen cualidades de regulación bioclimática.</p> <p>ECO.59. Analizar la exposición de los espacios públicos a las condiciones bioclimáticas (luz, viento, sol, lluvia, nieve, etc.) para permitir su uso a lo largo del día y del año.</p> <p>ECO.60. Definir la geometría de los barrios y las unidades vecinales de acuerdo con los requisitos de ventilación urbana (elegir distribuciones y materiales adaptados al clima tanto para las zonas verdes como para la edificación).</p> <p>ECO.61. Diseñar y aprovechar las superficies de agua (por ejemplo, como parte de los sistemas de gestión de aguas pluviales) para mejorar el confort urbano y contribuir a la ventilación natural de manzanas y edificios.</p> <p>ECO.114. Diseñar desarrollos y edificios compactos buscando un equilibrio entre la reducción de la superficie perimetral en relación con el volumen (para reducir pérdidas térmicas) y la necesidad de aprovechar la energía solar y la iluminación natural.</p> <p>ECO.115. Diseñar una estructura urbana que facilite que los edificios aprovechen la energía solar para calefacción y refrigeración pasiva y la luz natural (orientar los edificios hacia el sur, evitar las sombras estableciendo alturas en función de la separación entre edificios, diseñar las cubiertas para aumentar la eficiencia de los sistemas de captación solar).</p> <p>LB.12. Adoptar criterios bioclimáticos en la urbanización y la edificación</p> <p>LB.17. Aplicar criterios bioclimáticos en los espacios abiertos</p> <p>LB.45. Adaptar la morfología urbana a las condiciones bioclimáticas del lugar</p> <p>LB.46. Aprovechar los beneficios del sol y el viento en los edificios y espacios abiertos</p> <p>CGYM.6. Confort térmico.</p> <p>Calcular el confort térmico en el espacio urbano mediante programa de simulación, según microclima, materiales y vegetación, y actividad metabólica del individuo</p> <p>CGYM.7. Proporción de calle.</p> <p>Clasifica los valores de la proporción de calle en relación excelente, buena, suficiente, insuficiente y muy insuficiente</p>	ECOCITY	•				•				•		
			ECOCITY	•									•	
			ECOCITY	•										•
			ECOCITY	•										•
			ECOCITY	•										•
			ECOCITY	•										•
			ECOCITY	•										•
			ECOCITY	•										•
			LB	•										•
			LB	•										•
			LB	•										•
			LB	•										•
			CGYM	•										•
			CGYM	•										•

Tabla 3.19 Indicadores relacionados con el aspecto “energía” que tienen en cuenta el comportamiento pasivo en la edificación y el urbanismo (continuación)

Escala	Subcategoría	Indicador	Herramienta	Tipo		Tema relacionado					Considerado en la tesis		
				Cualitativo	Cuantitativo	Sitio y suelo	Morfología urbana	Movilidad y transporte	Naturaleza y biodiversidad	Edificación y vivienda		Materiales	
E	Demanda energética en el edificio (DE)	ECO.1.19. Reducir la demanda energética para refrigeración en climas cálidos reduciendo la absorción incontrolada de radiación solar de los edificios (incluyendo elementos de protección frente al sobrecalentamiento, por ejemplo, persianas, toldos, etc.) y el consumo de energía eléctrica (para evitar la generación adicional de calor en el interior de los edificios debida, por ejemplo, a equipos informáticos o electrodomésticos).	ECOCITY	•						•		•	
		ECO.1.20. Reducir la demanda eléctrica mediante el uso de sistemas eficientes de iluminación y el aprovechamiento de la luz natural (reflectores de luz, conductos de sol).	ECOCITY	•									
		ECO.1.21. Reducir el consumo de agua caliente mediante el empleo de instalaciones de ahorro de agua.	ECOCITY	•									
		ECO.1.22. Utilizar sistemas eficientes de ventilación (ventilación controlada, recuperación del calor) y sistemas de ventilación natural, incluyendo zonas ajardinadas interiores, y evitar el uso de los sistemas convencionales de aire acondicionado.	ECOCITY	•							•		
		ECO.1.23. Utilizar sistemas eficientes de refrigeración (refrigeración de componentes concretos, conductos subterráneos, bombas de absorción de calor, zonas ajardinadas interiores, elementos acuáticos, atrios y pequeños jardines).	ECOCITY	•							•		
		ECO.69. Emplear sistemas constructivos, de climatización y de ventilación que consuman poca energía y que aprovechen la energía solar pasiva.	ECOCITY								•		

En la Tabla 3.19 se observa que predominan los indicadores cualitativos frente a los cuantitativos, de manera que las directrices que proporcionan muchas de las herramientas carecen de un método claro de evaluación. Por ejemplo, las herramientas ECOCITY y LB proponen indicadores muy interesantes, como son la adopción de criterios bioclimáticos, la adaptación de la morfología urbana a las condiciones del lugar o el estudio de la demanda energética. Sin embargo, estos no establecen criterios específicos que deban ser tenidos en cuenta para evaluar estos indicadores ni proponen recomendaciones concretas que faciliten el ponerlos en práctica y que permitan, pues, una valoración objetiva de su grado de implementación. De ahí radica la necesidad de proponer unos indicadores que, de una manera transparente, tengan en cuenta aquellos parámetros del diseño de los edificios y del entorno urbano que pueden afectar directamente a su comportamiento energético.

Por el contrario, las herramientas LEED ND, BREEAM *Communities* y CASBEE UD sí proponen indicadores cuantitativos, así como un método para su medición. Las herramientas SEV y CGYM, a pesar que ser cualitativas, proponen ciertos indicadores cuantitativos que sí ofrecen pautas concretas para ser valorados.

A la hora de realizar la selección de los aspectos relevantes en el contexto de esta tesis, cabe indicar que se tienen en cuenta aquellos indicadores que hacen referencia a factores pasivos propios del edificio y del espacio urbano, siempre y cuando estos últimos tengan una influencia directa sobre el edificio. Es decir, indicadores que abordan aspectos únicamente del urbanismo y no tienen una interferencia directa sobre el edificio, no son considerados en el marco de este trabajo. Es el caso de aquellos indicadores que hacen referencia a aspectos bioclimáticos relacionados con la vegetación, las condiciones de viento o el diseño edificatorio propio del entorno urbano más próximo, que por ser específicos del contexto más inmediato al edificio, requieren de un estudio pormenorizado, no admitiendo generalizaciones. Es por ejemplo el caso de LEED.31, SEV.8, LB.17 o aquellos relacionados con el efecto isla de calor.

También por ello, se mantienen al margen los indicadores que hacen referencia a las instalaciones térmicas y demás equipamiento activo del edificio. Además, aquellos relacionados con las condiciones de viento y ventilación, quedan fuera del alcance, por tratarse de aspectos complejos que requieren por sí solos una investigación independiente en profundo detalle.

Así pues, atendiendo a estos criterios, los indicadores seleccionados son los que se relacionan en la Tabla 3.20, de la cual se extraen los aspectos que serán integrados en el desarrollo de la metodología de evaluación energética. La influencia de dichos aspectos, pues, se concluye como relevante en el comportamiento energético del parque edificatorio, quedando así justificada su selección.

Tabla 3.20 Aspectos relevantes para evaluar el comportamiento pasivo derivados de los indicadores energéticos de las HESU

Indicador	Aspecto derivado	Nivel	Tipo de variable
ECO.115	Morfología urbana [1]	Urbano	(Co)variables influyentes en el comportamiento energético
CGYM.7	Proporción de la calle [2]		
LEED.46	Orientación solar de los edificios según su contexto urbano [3]		
CASBEE.17			
INDI.25			
ECO.114	Grado de compacidad de los edificios [4]	Edificio	Variables energéticas para la evaluación del comportamiento energético pasivo
ECO.117	Transmitancia de la envolvente del edificio para reducir la demanda energética [5]		
ECO.118	Reducir la demanda energética de calefacción y de refrigeración [6]	Urbano-edificio	
ECO.119			
CGYM.6	Confort térmico en el entorno urbano [7]		
SEV.9			
ECO.59			
ECO.60			
ECO.61			
BRIDGE.5			
BRIDGE.7			

Así pues, se seleccionan como covariables las siguientes:

- La morfología urbana [1]
- La proporción de calle [2]
- La orientación solar de los edificios [3]
- La compacidad [4]
- La transmitancia térmica de la envolvente [5]

Como variables respuesta o indicadores para evaluar el comportamiento energético pasivo se seleccionan:

- La demanda energética [6]
- El confort térmico [7]

Se observa de la Tabla 3.19 y la Tabla 3.20 que los indicadores que abordan el edificio y el urbanismo están muchas veces íntimamente relacionados. Por ejemplo, en cuanto al aspecto de soleamiento y sombras que afectan a un edificio individual, las herramientas ensalzan el importante papel de los edificios que lo rodean, lo que reafirma una vez más que el urbanismo no puede ser obviado para analizar el comportamiento energético del parque edificatorio, aun a nivel individual de edificio. Así pues, la proporción de calle, junto con la morfología urbana, constituye un elemento de destacada importancia. En relación al edificio, la compacidad vendrá determinada por la propia morfología urbana, de manera que estas también están relacionadas. La transmitancia de la envolvente térmica es el único elemento que no viene condicionado por las otras cuatro covariables, pues únicamente depende de las soluciones constructivas que conforman los cerramientos del edificio.

La demanda energética es seleccionada como indicador para evaluar el comportamiento energético del parque edificatorio, pues esta da una medida de las necesidades energéticas reales necesarias para alcanzar las condiciones de confort térmico, teniendo en cuenta aspectos inherentes a la configuración arquitectónica y constructiva del edificio, como son la morfología, la calidad de la envolvente o las condiciones de soleamiento, propios del diseño pasivo.

Por último, cabe indicar que, aunque destacan como especialmente interesantes los indicadores relativos al estudio del confort térmico (CGYM.6, SEV.9, ECO.59, ECO.60, ECO.61, BRIDGE.5 y BRIDGE.7), estos únicamente se tratan a nivel del espacio público urbano, y no del edificio, promocionando criterios como son la disposición de vegetación y láminas de agua que regulen el metabolismo urbano y mitiguen el desconfort térmico de los peatones. Se identifica así que no se aborda en las HESU el confort térmico propio del edificio, debido en parte, al enfoque urbano de las herramientas. Sin embargo, se considera este un factor importante para evaluar el comportamiento pasivo del parque edificado y, por tanto, un factor a tener en cuenta para el desarrollo de la metodología, pero abordado desde la influencia que tiene el diseño del entorno urbano en el confort térmico interior del edificio.

En este apartado, el análisis de los aspectos relacionados con la evaluación pasiva considerados por las HESU ha permitido seleccionar las variables respuesta y covariables, como elementos integrantes en el desarrollo de la metodología. Así, de la Tabla 3.20 se desprenden siete aspectos clave, dos de ellos como indicadores o variables respuesta de evaluación del comportamiento energético y los cinco restantes, como aspectos susceptibles de influir en dicho comportamiento energético del parque edificatorio, o covariables.

Seleccionadas las variables que integrarán la metodología, se abre paso a su definición. Para ello, el siguiente apartado se dedica al análisis de los aspectos considerados en las metodologías de evaluación energética analizadas en el apartado 2.4 del Capítulo 2, lo que contribuirá a definir las variables.

3.3 ANÁLISIS DE ASPECTOS CONSIDERADOS EN LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN ENERGÉTICA

Una vez las variables respuesta y las covariables han sido seleccionadas, en este apartado se analiza cómo las metodologías de evaluación energética abordan estas variables, lo que contribuirá a su definición. Partiendo de la revisión de las metodologías de evaluación energética del parque edificatorio, analizadas en el apartado 2.4 del Capítulo 2, se lleva a cabo un análisis exhaustivo de las mismas para identificar qué aspectos se consideran en cada una de ellas. Para ello, se seleccionan aquellos trabajos basados en un enfoque *bottom-up* que han desarrollado específicamente un modelo o metodología de evaluación energética.

La Tabla 3.21 presenta las variables que cada uno de ellos considera y las clasifica, respetando la misma estructura que en la Tabla 3.20, en: covariables influyentes en el comportamiento energético y variables energéticas que se evalúan.

Tabla 3.21 Aspectos considerados en los modelos bottom-up analizados

Referencia	Covariables influyentes en el comportamiento energético relativas a ...							Aspectos activos						Variables energéticas relacionadas							
	Urbano			Aspectos pasivos				Aspectos activos						Otros				Variables energéticas relacionadas			
	Morfología urbana [1]	Proporción de calle [2]	Orientación [3]	Tipología	Factor de forma (S/V)	Edificio		Ocupación	Otras instalaciones	ACS	Humedad relativa	Ganancias solares	MEE	Ingresos del hogar	Salud pública	Consumo energético	Demanda energética[6]	Emisiones de CO ₂	Costes	Calificación energética	(Dis)confort térmico [7]
						Compacidad[4]	Envolvente [5]														
CREEM (Farahbakhsh et al., 1998)																					
Huang and Berkeley (2000)																					
Ren et al. (2012)																					
Siakiri (2000)																					
BREEHOMES (Shorroock and Dunster, 1997)																					
Johnston et al. (2005)																					
UKDCM (Boardman, 2007)																					
DeCarb (Matarajan and Levermore, 2007)																					
EEP (Jones et al., 2007)																					
CDPM (Firth et al., 2010)																					
DECM (Cheng and Steemers, 2011)																					
VerbCO2M (Hens et al., 2001)																					
TABULA (Dascalaki et al., 2011)																					
Dall'O' et al. (2012)																					
Caputo et al. (2013)																					
Ascione et al. (2013)																					
SLABE (Mauro et al., 2015)																					
Penna et al. (2015)																					
TIMES (Gouveia et al., 2012)																					
TABULA (Ferio and Teissier, 2015)																					
Fonseca and Schlueter (2015)																					
QuBEC (Aksøezen et al., 2015)																					
ECCABS (Mata et al., 2013)																					
McKenna et al. (2013)																					
TABULA (Instituto Valenciano de la Edificación, 2014)																					
Considerado en la tesis																					

Cabe destacar que los aspectos relacionados con el entorno urbano (morfología urbana, proporción de calle y orientación), son prácticamente obviados en los estudios revisados. Sin embargo, como ya se ha apuntado anteriormente, estos cobran importancia en este trabajo, el cual integra la perspectiva urbana. Teniendo en cuenta lo expuesto en el apartado anterior 3.2.3, tanto la morfología urbana, la proporción de calle, como la orientación, son tomados como covariables susceptibles de influir en el comportamiento energético del parque edificado.

A nivel de edificio, se puede deducir de la observación de la Tabla 3.21 que, para definir el grado de compacidad, la mayoría de modelos consideran el factor de forma (S/V) y la tipología edificatoria. Por otro lado, para definir la transmitancia de la envolvente térmica, gran parte de los modelos tienen en cuenta la antigüedad del edificio, la cual lleva implícita información sobre la composición de sus cerramientos y, por tanto, de su transmitancia térmica (U). En el marco de este trabajo, tanto el factor de forma (S/V) como la antigüedad del edificio, serán tomadas como covariables.

En relación a los aspectos activos, las instalaciones térmicas (HVAC, ACS y otro equipamiento), a pesar de ser consideradas por casi la mitad de los modelos, no serán tenidas en cuenta en esta investigación, ya que la metodología a desarrollar se enfoca desde el punto de vista de comportamiento energético pasivo del parque edificado.

En cuanto a las variables energéticas analizadas, se identifica que predomina el estudio del consumo energético y las emisiones de CO_2 asociadas. Sin embargo, para poder determinarlas deberían ser tenidas en cuenta las instalaciones del edificio, que como se ha indicado anteriormente, no dan muestra del comportamiento pasivo de los edificios. Lo mismo ocurre con la calificación energética. Esta es abordada en cuatro de los modelos, proporcionando una escala de valoración del consumo energético, pero sería necesario incluir las instalaciones para poder determinarla. Así, la demanda energética es considerada por la mitad de los modelos, como indicador para evaluar el comportamiento energético del parque edificado.

Por último, el confort térmico es analizado únicamente en dos de los modelos (Mauro et al., 2015; Penna et al., 2015) a través del indicador de tiempo en el que el edificio permanece en condiciones de discomfort. Sin embargo, como se apuntó en el apartado anterior, este resulta un aspecto muy interesante a ser evaluado, y más aún cuando se pretende evaluar el comportamiento energético de los edificios desde el punto de vista pasivo. Por ello, este es seleccionado como indicador variable energético en el contexto de este trabajo.

3.4 DEFINICIÓN DE VARIABLES RESPUESTA Y COVARIABLES

Como conclusión de los apartados anteriores, quedan seleccionadas las siete variables que integrarán la metodología a proponer, la cual se aborda en el Capítulo 4. La Figura 3.7 muestra la selección de las variables respuesta y de las covariables. En los próximos apartados, 3.4.1 y 3.4.2, se definen las variables respuesta y las covariables, respectivamente, atendiendo a la revisión de la literatura realizada anteriormente.

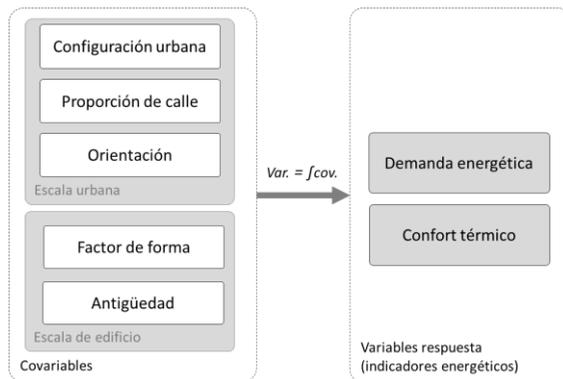


Figura 3.7 Covariables y variables respuesta seleccionadas

3.4.1 DEFINICIÓN DE VARIABLES RESPUESTA (INDICADORES ENERGÉTICOS)

El presente apartado define las dos variables respuesta seleccionadas, cada una de las cuales se desglosa en otras dos, distinguiendo entre el periodo de verano e invierno. Así pues, se definen cuatro indicadores cuyos valores constituirán los resultados de implementar la metodología en un área urbana consolidada.

- **Demanda energética de refrigeración (DE_r) y demanda energética de calefacción (DE_c).** Ambas variables miden la cantidad de energía que las instalaciones térmicas del edificio deben proporcionar para asegurar las condiciones interiores de confort, de acuerdo al uso del edificio y a la zona climática (CTE, 2013), para calefacción y refrigeración, respectivamente. Se expresa en kWh/m²año.
- **Horas de disconfort en verano (HD_v) y horas de disconfort de invierno (HD_i).** Estas son equivalentes a las horas no satisfechas de confort de acuerdo a ASHRAE y miden el tiempo en que el ratio de humedad y temperatura operativa no se corresponde con ASHRAE 55-2004 en verano e invierno, teniendo en cuenta el nivel de vestimenta (DesignBuilder UK, 2015); para verano e invierno, respectivamente. Se expresan en horas/año.

Tanto la demanda energética como el confort térmico constituyen dos indicadores que aportan una medida del comportamiento pasivo de los edificios. Los edificios pasivos combinan un confort térmico interior elevado con un consumo energético muy bajo. Las premisas para alcanzar estos dos objetivos son el uso de un alto grado de aislamiento térmico en la envolvente, un control riguroso de los puentes térmicos, un control de las infiltraciones de aire no deseadas, el uso de carpinterías de calidad y el aprovechamiento óptimo del soleamiento, de forma tal que mediante la ventilación mecánica a través de un recuperador de calor se consiga el aporte necesario para su climatización, tanto en invierno como en verano, sin recurrir a ningún otro sistema (Crespo et al., 2011). Por tanto, para el estudio del comportamiento pasivo de un edificio, se analizará su funcionamiento teniendo en cuenta estos factores de diseño y prescindiendo del efecto de los sistemas térmicos. Un edificio con baja demanda energética llevará asociado un bajo consumo energético para lograr las condiciones óptimas de confort, por lo que la premisa principal es limitar al máximo la demanda

energética de los edificios, como ya exige el Código Técnico de la Edificación en su Documento Básico de Ahorro de Energía, DB HE1 Limitación de la demanda energética (CTE, 2013).

3.4.2 DEFINICIÓN DE COVARIABLES

A continuación, se describen las cinco covariables seleccionadas, las cuales se representan en la Figura 3.8.

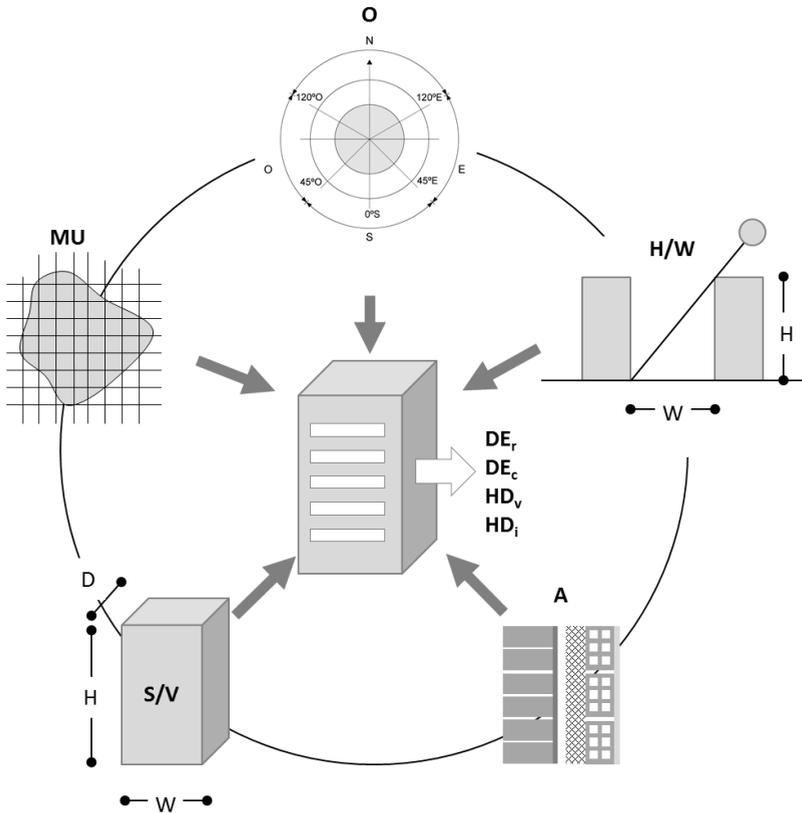


Figura 3.8 Covariables consideradas para analizar el comportamiento energético de los edificios a escala urbana (O: orientación; H/W: proporción de calle; A: año de construcción; S/V: factor de forma; MU: configuración urbana)

- **Morfología urbana o patrón de manzana urbana (MU)**

La morfología urbana se refiere a la geometría del trazado urbano que define las manzanas donde los edificios están emplazados. Futcher y Mills (2013) apuntaron que el papel que juega la configuración urbana en el comportamiento energético de los edificios es habitualmente ignorado, cuando este puede influir enormemente en sus necesidades energéticas relativas a calefacción y refrigeración

(Capeluto, 2003; Košir et al., 2014). Su impacto en los diferentes aspectos como por ejemplo, cargas energéticas, consumo energético, emisiones de CO₂ y accesibilidad solar, ha sido destacado por numerosos autores. Por ejemplo, Salat (2009) indicó algunos aspectos que pueden variar considerablemente dependiendo de la morfología urbana (factor de forma de los edificios, densidad, porosidad, iluminación y ventilación natural y comportamiento de la envolvente térmica) y destacó que todos ellos afectan notablemente al comportamiento energético de los edificios. Así pues, el trazado urbano dibuja los patrones típicos de manzana urbana en una ciudad, las cuales representan la unidad urbana más pequeña que incluye no sólo el edificio aislado sino un conjunto de edificios que se comportan energéticamente como un conjunto.

Según el tipo de trazado del viario público (irregular, linear, radial u ortogonal), se conforman diferentes tipologías de manzanas. Dada la gran casuística existente, la morfología de la manzana deberá ser estudiada de forma pormenorizada para cada ciudad. La Figura 3.9 muestra un ejemplo de tipologías de manzana, originadas por un trazado de las calles que atiende a una retícula ortogonal propia de un ensanche urbano (derecha), y un ejemplo de tipologías de manzana irregular, originada por un trazado radial que da lugar a una estructura anárquica del viario, propia de un núcleo histórico (izquierda).



Figura 3.9 Manzanas en trazado radial (izquierda) y manzanas en trazado ortogonal (derecha)
(Fuente: elaboración propia a partir de Google Maps)

Será necesario un estudio en profundidad del planeamiento urbanístico de la ciudad para identificar los patrones de manzana urbana, que definirán su configuración.

- **Proporción o ratio altura-anchura de calle (H/W)**

Se define como la proporción que existe entre la distancia entre dos fachadas (W) y la altura de los edificios de los que forman parte (H). Esta covariable H/W incide en el confort térmico y lumínico de la calle y de los edificios, así como también en la percepción de equilibrio que se da entre el volumen edificado y el porcentaje de cielo que se visualiza desde el espacio público. Proporciona además información sobre la presión que ejerce la compacidad de un tejido urbano en la sección de calle.

La proporción H/W es responsable de la accesibilidad solar en los edificios. Altos ratios de H/W implican calles estrechas y por tanto menores oportunidades de soleamiento en los edificios de su entorno. De hecho, Okeil (2010) destacó la necesidad de definir indicadores solares para proveer a los urbanistas de herramientas para la toma de decisiones sobre el buen aprovechamiento del sol en las ciudades. Anteriormente, Oke (1988) señaló a la geometría urbana como un factor clave para el estudio de la accesibilidad solar y definió el porcentaje de superficie de iluminación en un muro

orientado a sur para un rango de ratios H/W en diferentes latitudes. En la misma línea, Fitcher y Mills (2013) examinaron en su estudio la influencia de la forma de la calle en el comportamiento energético de los edificios del entorno, utilizando el ratio H/W. Con el mismo fin, Martins et al. (2014) propusieron en su modelo la distancia entre edificios en calles con eje norte-sur y este-oeste como un condicionante para analizar el potencial solar en la fachada de los edificios. Yezioro et al. (2006) examinaron el asoleo en las fachadas orientadas hacia los patios interiores de manzana en doce tipologías de manzana urbana con diferentes proporciones (longitud, anchura y altura).

En las propias HESU analizadas, el indicador CGYM.7 Proporción de calle, propone una clasificación de los tramos de calle en función del grado de apertura de vista en el cielo, desglosándolos en:

- $H/W < 0,5$: excelente
- $0,5 < H/W < 1$: buena
- $1 < H/W < 2$: suficiente
- $2 < H/W < 3,5$: insuficiente
- $H/W > 3,5$: muy insuficiente

La latitud tiene un papel importante en la proporción H/W, pues determina el ángulo de elevación solar. La elevación solar en el periodo estival es alta (por ejemplo, alcanza un valor de $73,45^\circ$ en el solsticio de verano en latitudes medias de $40^\circ N$), por lo que los rayos solares no encontrarán en esta época del año dificultad en llegar a la superficie vertical de las fachadas e incluso a la superficie horizontal del viario público. Sin embargo, en el periodo invernal la elevación solar es muy baja ($26,55^\circ$ en el solsticio de invierno para latitud $40^\circ N$), lo que provocará que los propios edificios situados enfrente del edificio objeto de estudio obstaculicen los rayos solares en la mayoría de los casos. La Figura 3.10 muestra gráficamente ambas situaciones. Una relación alta H/W supondrá calles estrechas con alta obstrucción solar, mientras que una baja relación H/W aumentará las posibilidades de ganancia solar en los edificios que recaen a dichas calles.

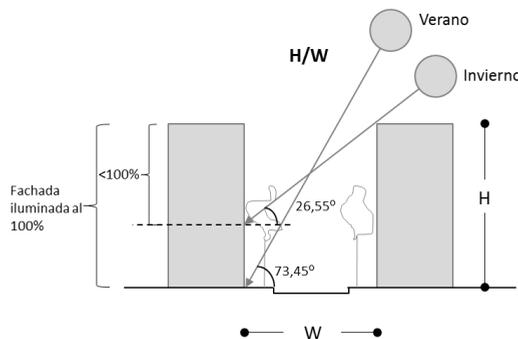


Figura 3.10 Obstrucción solar provocada por el ratio H/W de una calle en una latitud de $40^\circ N$

● **Orientación solar de la fachada principal (O)**

La orientación de una fachada se caracteriza mediante el ángulo α , que es el formado por el norte geográfico y la normal exterior de la fachada, medido en sentido horario (CTE, 2013). Según el Código Técnico de la Edificación se distinguen ocho orientaciones, que han sido simplificadas en cuatro en el contexto del presente trabajo. La Figura 3.11 muestra cómo se ha realizado dicha

simplificación y los sectores angulares resultantes contenidos en cada una de las cuatro orientaciones planteadas: norte, sur, este y oeste.

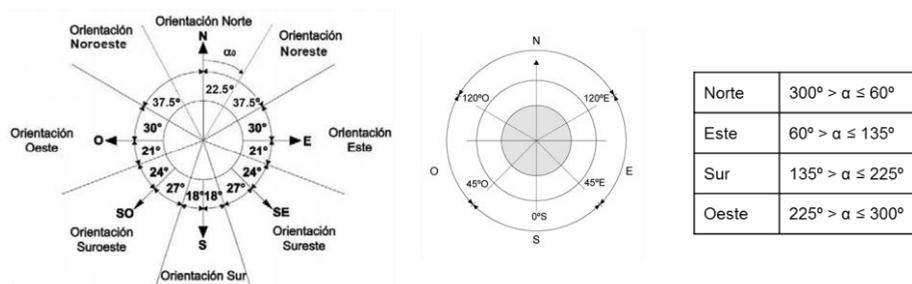


Figura 3.11 Definición de la orientación solar de la fachada principal en CTE (izquierda) y en el marco de la tesis (derecha)

- **Factor de forma del edificio (S/V)**

La tipología de edificio define su morfología. En la revisión anterior de aspectos se ha identificado que los autores caracterizan al edificio de dos formas diferentes: por su tipología edificatoria y por su factor de forma. De hecho, el factor de forma permite representar de una forma numérica la tipología del edificio. Este viene definido por la relación entre la superficie total externa de la envolvente del edificio (S) y su volumen interior (V):

$$S/V [m^{-1}] = \frac{S}{V} [m^2/m^3] \text{ (Granadeiro et al., 2013)}$$

donde,

S superficie total externa de la envolvente del edificio [m^2]

V volumen interno [m^3]

En el presente trabajo, se ha tomado como referencia el factor de forma para identificar la tipología del edificio, de manera que esta pueda ser representada por un coeficiente numérico. El coeficiente S/V cuantifica la superficie de envolvente expuesta al ambiente exterior y, por tanto, da una medida del intercambio de calor entre el edificio y el exterior que, como apunta Aksoezen et al. (2015), está íntimamente relacionado con el trazado urbano y la densidad edificatoria.

Desde el punto de vista energético, las tipologías se comportan de diferente forma. Por ejemplo, un edificio plurifamiliar entre medianeras y una vivienda unifamiliar aislada presentan, previsiblemente, distintos factores de forma, siendo mayor el de la vivienda aislada, pues la superficie de envolvente que está expuesta al ambiente exterior en relación a su volumen, es mucho mayor. Considerando que la temperatura exterior es generalmente el mayor condicionante para la demanda energética del edificio, el factor de forma es directamente proporcional a ésta, como apuntaba Enshen (2005) en su trabajo. Así, para un mismo volumen de edificio, un menor factor de forma significa mayor compactidad y por tanto, menor intercambio de calor entre el ambiente interior y el exterior, lo que está relacionado con una mayor eficiencia energética. Factores de forma altos implican una baja compactidad, por lo que edificios poco compactos tenderán a demandar más energía para alcanzar las condiciones de confort.

- **Año de construcción (A)**

La última de las covariables corresponde a la transmitancia térmica de los cerramientos que constituyen la envolvente térmica de un edificio. La importancia de seleccionar el año de construcción del edificio como covariable reside en su fuerte interdependencia con la demanda energética, como Aksoezen et al. (2015) demostraron en su trabajo. En este sentido, como se extrae de la revisión de la Tabla 3.21 y del apartado 2.3.2 del Capítulo 2, la época de construcción de un edificio condiciona enormemente las soluciones constructivas empleadas para la ejecución de su envolvente térmica, y así lo reflejan muchos de los trabajos revisados, cuyos autores utilizan el año de construcción para definir las características de la envolvente. En la mayoría de trabajos, la línea temporal queda delimitada en diversos periodos temporales que responden a hitos históricos y legislativos, así como a situaciones económicas relevantes ocurridas en la historia.

Las diferentes soluciones constructivas de la envolvente de los edificios darán lugar a una transmitancia térmica que condicionará la transferencia de calor entre el interior del edificio y el ambiente exterior. Por ello, el año de construcción quedará definido en periodos temporales a los que se les asignará un conjunto de transmitancias térmicas para cada una de las soluciones constructivas de los cerramientos de la envolvente, típicas de cada uno de esos periodos.

3.5 CONCLUSIÓN

En este capítulo se ha abordado, desde la perspectiva del aspecto energético que integra la sostenibilidad urbana, la selección de las variables que serán consideradas para desarrollar la metodología de evaluación energética en el Capítulo 4. El objetivo de profundizar en las HESU es identificar qué aspectos tienen una influencia directa sobre el comportamiento energético pasivo del parque edificatorio, poniendo las miras más allá del edificio como ente aislado, y atendiendo así a la morfología urbana, que determina enormemente su comportamiento, como se desprende de la literatura revisada.

Analizadas las metodologías existentes en la literatura sobre evaluación energética del parque edificatorio, se identifica que los aspectos relacionados con el entorno urbano son prácticamente obviados por estas, las cuales ponen más énfasis en aquellos aspectos que tienen que ver con la eficiencia de las instalaciones técnicas para evaluar, principalmente, el consumo energético y las emisiones de CO₂. Por ello, es necesario definir una metodología que asuma un enfoque diferente basado en los parámetros de diseño, tanto del edificio como del entorno urbano, que condicionan el comportamiento energético de los edificios que constituyen un entorno construido ya consolidado. Este aspecto le otorga a la metodología un carácter centrado en la evaluación pasiva, basada en los condicionantes del propio diseño del entramado urbano, reconocidos como estrategia fundamental para reducir la demanda energética en los edificios, previamente a hacer uso de los sistemas activos, que servirán más bien como elementos correctores.

Así pues, se identifican cuatro indicadores de evaluación energética del comportamiento pasivo, siendo estos: la demanda energética de calefacción (DE_c) y de refrigeración (DE_r) y las horas del discomfort en invierno (HD_i) y en verano (HD_v). Por otro lado, se identifican cinco covariables, tres de ellas relacionadas con el entorno urbano, morfología urbana (MU), proporción de calle (H/W) y orientación (O), y dos de ellas relacionadas con el edificio, factor de forma (S/V) y año de construcción (A).

Cabe indicar con respecto a la covariable A, la cual integra las características constructivas de la envolvente térmica de los edificios asociadas a periodos temporales de construcción, que el año de construcción se toma a partir de la información catastral que figura en la Dirección General del Catastro. Esta información no siempre se encuentra actualizada, ya que algunos edificios pueden haber experimentado reformas que no se encuentren controladas urbanísticamente. Por ello, este aspecto podría generar cierta incertidumbre en ciertos casos, a la hora de considerar las características constructivas en base al año de construcción.

3.6 REFERENCIAS

- Aksoezen, M., Daniel, M., Hassler, U., Kohler, N., 2015. Building age as an indicator for energy consumption. *Energy Build.* 87, 74-86. doi:10.1016/j.enbuild.2014.10.074
- Ascione, F., De Masi, R.F., de Rossi, F., Fistola, R., Sasso, M., Vanoli, G.P., 2013. Analysis and diagnosis of the energy performance of buildings and districts: Methodology, validation and development of Urban Energy Maps. *Cities* 35, 270-283. doi:10.1016/j.cities.2013.04.012
- Boardman, B., 2007. Examining the carbon agenda via the 40% House scenario. *Build. Res. Inf.* 35, 363-378. doi:10.1080/09613210701238276
- Bourdic, L., Salat, S., Nowacki, C., 2012. Assessing cities: a new system of cross-scale spatial indicators. *Build. Res. Inf.* 40, 592-605. doi:10.1080/09613218.2012.703488
- Bouzarovski, S., Sarlamanov, R., Petrova, S., 2011. The Governance of Energy Poverty in Southeastern Europe.
- Byrd, Ho, 2012. Transport energy and city density: A case study of how renewable energy can reverse the curve, en: 6th Australasian Housing Researchers' Conference. Adelaide.
- Capeluto, I.G., 2003. The influence of the urban environment on the availability of daylighting in office buildings in Israel. *Build. Environ.* 38, 745-752. doi:10.1016/S0360-1323(02)00238-X
- Caputo, P., Costa, G., Ferrari, S., 2013. A supporting method for defining energy strategies in the building sector at urban scale. *Spec. Sect. Long Run Transitions to Sustain. Econ. Struct. Eur. Union Beyond* 55, 261-270. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.12.006
- Cheng, V., Steemers, K., 2011. Modelling domestic energy consumption at district scale: A tool to support national and local energy policies. *Environ. Model. Softw.* 26, 1186-1198. doi:10.1016/j.envsoft.2011.04.005
- Crespo, J., Soto, J., ARKE arquitectos, Bengoa, A., Nisch, B., Díaz, N., Vogt, A., Díaz, S., Royo, R., Berger, W., Vidal, J., Hernández, M., Barambio, M., Wassouf, M., 2011. Guía del estándar Passivhaus. Edificios de consumo energético casi nulo. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, Madrid.
- CTE, 2013. Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, por la que se actualiza el Documento Básico DB-HE Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación, aprobado por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo. España.
- Dall'O', G., Galante, A., Torri, M., 2012. A methodology for the energy performance classification of residential building stock on an urban scale. *Energy Build.* 48, 211-219. doi:10.1016/j.enbuild.2012.01.034

- Dascalaki, E.G., Droutsas, K.G., Balaras, C.A., Kontoyiannidis, S., 2011. Building typologies as a tool for assessing the energy performance of residential buildings – A case study for the Hellenic building stock. *Energy Build.* 43, 3400-3409. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.002>
- DesignBuilder UK, 2015. DesignBuilder help [WWW Document]. URL <http://www.designbuilder.co.uk/helpv3.4/> (accedido 12.12.15).
- Enshen, L., 2005. Are the energy efficient rates (RVRs) approximate in different climatic locations for the same building with the same reform? *Build. Environ.* 40, 557-562. doi:10.1016/j.buildenv.2004.06.015
- Farahbakhsh, H., Ugursal, V.I., Fung, A.S., 1998. A residential end-use energy consumption model for Canada. *Int. J. Energy Res.* 22, 1133-1143. doi:10.1002/(SICI)1099-114X(19981025)22:13<1133::AID-ER434>3.0.CO;2-E
- Firth, S.K., Lomas, K.J., Wright, a. J., 2010. Targeting household energy-efficiency measures using sensitivity analysis. *Build. Res. Inf.* 38, 25-41. doi:10.1080/09613210903236706
- Florio, P., Teissier, O., 2015. Estimation of the Energy Performance Certificate of a housing stock characterised via qualitative variables through a typology-based approach model: A fuel poverty evaluation tool. *Energy Build.* 89, 39-48. doi:10.1016/j.enbuild.2014.12.024
- Fonseca, J.A., Schlueter, A., 2015. Integrated model for characterization of spatiotemporal building energy consumption patterns in neighborhoods and city districts. *Appl. Energy* 142, 247-265. doi:10.1016/j.apenergy.2014.12.068
- Futcher, J.A., Mills, G., 2013. The role of urban form as an energy management parameter. *Energy Policy* 53, 218-228. doi:10.1016/j.enpol.2012.10.080
- Gaffron, P., Huismans, G., Skala, F., 2008. *Ecocity book II: how to make it happen*. Vienna.
- Ghosh, S., Vale, R., 2009. Typologies and Basic Descriptors of New Zealand Residential Urban Forms. *J. Urban Des.* 14, 507-536. doi:10.1080/13574800903265371
- González, A., Donnelly, A., Jones, M., Chrysoulakis, N., Lopes, M., 2013. A decision-support system for sustainable urban metabolism in Europe. *Environ. Impact Assess. Rev.* 38, 109-119. doi:10.1016/j.eiar.2012.06.007
- Gouveia, J.P., Fortes, P., Seixas, J., 2012. Projections of energy services demand for residential buildings: Insights from a bottom-up methodology. *Energy* 47, 430-442. doi:10.1016/j.energy.2012.09.042
- Granadeiro, V., Correia, J.R., Leal, V.M.S., Duarte, J.P., 2013. Envelope-related energy demand: A design indicator of energy performance for residential buildings in early design stages. *Energy Build.* 61, 215-223. doi:10.1016/j.enbuild.2013.02.018
- Hens, H., Verbeeck, G., Verdonck, B., 2001. Impact of energy efficiency measures on the CO2 emissions in the residential sector, a large scale analysis. *Energy Build.* 33, 275-281.
- Huang, Y.J., Berkeley, L., 2000. A Bottom-Up Engineering Estimate of the Aggregate Heating and Cooling Loads of the Entire US Building Stock Prototypical Residential Buildings, en: *Proceedings of the 2000 ACEEE summer study on energy efficiency in buildings*. Pacific Grove, pp. 135-148.
- Instituto Valenciano de la Edificación, 2014. *TABULA. Catálogo de tipología edificatoria residencial en España*. Valencia.

- Johnston, D., Lowe, R., Bell, M., 2005. An exploration of the technical feasibility of achieving CO2 emission reductions in excess of 60% within the UK housing stock by the year 2050. *Energy Policy* 33, 1643-1659. doi:10.1016/j.enpol.2004.02.003
- Jones, P., Patterson, J., Lannon, S., 2007. Modelling the built environment at an urban scale—Energy and health impacts in relation to housing. *Landsc. Urban Plan.* 83, 39-49. doi:10.1016/j.landurbplan.2007.05.015
- Košir, M., Capeluto, I.G., Krainer, A., Kristl, Ž., 2014. Solar potential in existing urban layouts—Critical overview of the existing building stock in Slovenian context. *Energy Policy* 69, 443-456. doi:10.1016/j.enpol.2014.01.045
- Luederitz, C., Lang, D.J., Von Wehrden, H., 2013. A systematic review of guiding principles for sustainable urban neighborhood development. *Landsc. Urban Plan.* 118, 40-52. doi:10.1016/j.landurbplan.2013.06.002
- Makido, Y., Dhakal, S., Yamagata, Y., 2012. Relationship between urban form and CO2 emissions: Evidence from fifty Japanese cities. *Urban Clim.* 2, 55-67. doi:10.1016/j.uclim.2012.10.006
- Martins, T.A.L., Adolphe, L., Bastos, L.E.G., 2014. From solar constraints to urban design opportunities: Optimization of built form typologies in a Brazilian tropical city. *Energy Build.* 76, 43-56. doi:10.1016/j.enbuild.2014.02.056
- Mata, É., Kalagasidis, A.S., Johnsson, F., 2013. A modelling strategy for energy, carbon, and cost assessments of building stocks. *Energy Build.* 56, 100-108. doi:10.1016/j.enbuild.2012.09.037
- Mauro, G.M., Hamdy, M., Vanoli, G.P., Bianco, N., Hensen, J.L.M., 2015. A new methodology for investigating the cost-optimality of energy retrofitting a building category. *Energy Build.* 107, 456-478. doi:10.1016/j.enbuild.2015.08.044
- McKenna, R., Merkel, E., Fehrenbach, D., Mehne, S., Fichtner, W., 2013. Energy efficiency in the German residential sector: A bottom-up building-stock-model-based analysis in the context of energy-political targets. *Build. Environ.* 62, 77-88. doi:10.1016/j.buildenv.2013.01.002
- Natarajan, S., Levermore, G.J., 2007. Predicting future UK housing stock and carbon emissions. *Energy Policy* 35, 5719-5727. doi:10.1016/j.enpol.2007.05.034
- Oke, T.R., 1988. Street design and urban canopy layer climate. *Energy Build.* 11, 103-113. doi:10.1016/0378-7788(88)90026-6
- Okeil, A., 2010. A holistic approach to energy efficient building forms. *Energy Build.* 42, 1437-1444. doi:10.1016/j.enbuild.2010.03.013
- Parlamento Europeo, 2008. Directiva 2008/98/CE, de 19 de Noviembre, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.
- Penna, P., Prada, A., Cappelletti, F., Gasparella, A., 2015. Multi-objectives optimization of Energy Saving Measures in existing buildings. 49th AICARR Int. Conf. - Hist. Exist. Build. Des. retrofit 95, 57-69. doi:10.1016/j.enbuild.2014.11.003
- Ren, Z., Paevere, P., McNamara, C., 2012. A local-community-level, physically-based model of end-use energy consumption by Australian housing stock. *Energy Policy* 49, 586-596.
- Rueda, S., 2007. Barcelona, ciudad mediterránea, compacta y compleja. Una visión de futuro más sostenible. Barcelona.
- Salat, S., 2009. Energy loads, CO2 emissions and building stocks: morphologies, Typologies, Energy Systems and Behaviour. *Build. Res. Inf.* 37, 598-609. doi:10.1080/09613210903162126

- Sharifi, A., Murayama, A., 2013. A critical review of seven selected neighborhood sustainability assessment tools. *Environ. Impact Assess. Rev.* 38, 73-87. doi:10.1016/j.eiar.2012.06.006
- Shorrocks, L., Dunster, J., 1997. The physically-based model BREHOMES and its use in deriving scenarios for the energy use and carbon dioxide emissions of the UK housing stock. *Energy Policy* 25, 1027-1037. doi:10.1016/S0301-4215(97)00130-4
- Snäkin, J.-P.A., 2000. An engineering model for heating energy and emission assessment The case of North Karelia, Finland. *Appl. Energy* 67, 353-381.
- Wilson, B., 2013. Urban form and residential electricity consumption: Evidence from Illinois, USA. *Landsc. Urban Plan.* 115, 62-71. doi:10.1016/j.landurbplan.2013.03.011
- Yezioro, A., Capeluto, I.G., Shaviv, E., 2006. Design guidelines for appropriate insolation of urban squares. *Renew. Energy* 31, 1011-1023. doi:10.1016/j.renene.2005.05.015
- Zhao, J., Xiao, L., Tang, L., Shi, L., Su, X., Wang, H., Song, Y., Shao, G., 2014. Effects of spatial form on urban commute for major cities in China. *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.* 1-8. doi:10.1080/13504509.2014.922132



4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

Propuesta **metodológica** para la caracterización del **comportamiento energético pasivo** del parque edificatorio **residencial** existente considerando su contexto **urbano**.

4.1 INTRODUCCIÓN

El presente capítulo propone una metodología de evaluación energética pasiva del parque edificatorio residencial existente basada en las variables respuesta y covariables identificadas en el Capítulo 3 y define los procedimientos necesarios a seguir en cada una de las etapas de las que se compone.

El capítulo está estructurado según se muestra en la Figura 4.1. En el apartado 4.2 se define el objetivo general de la metodología y se presentan los requisitos que esta debe reunir. El apartado 4.3 presenta un análisis del nivel de satisfacción de los requisitos establecidos por las metodologías ya existentes en la literatura, basadas en un enfoque *bottom-up*, y revisadas anteriormente en los Capítulos 2 y 3, del que se extrae la necesidad de desarrollar una nueva metodología que reúna la totalidad de los requisitos expuestos. En el apartado 4.4 se presenta la estructura de la metodología y los apartados 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8 desarrollan cada una de las etapas que la componen.

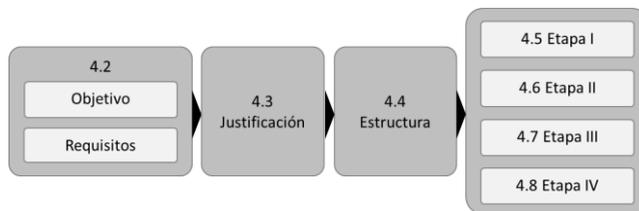


Figura 4.1 Estructura del Capítulo 4

4.2 OBJETIVO Y REQUISITOS DE LA METODOLOGÍA

El objetivo de la metodología es establecer un procedimiento transparente para la evaluación energética del comportamiento pasivo del parque edificatorio residencial existente, teniendo en cuenta los condicionantes de la morfología urbana.

Tomando como referencia las conclusiones extraídas en el Capítulo 2, se establecen los requisitos que debe reunir la metodología, los cuales se exponen en la Figura 4.2. Como pre-requisito se establece que el enfoque en el que debe basarse la metodología es el *bottom-up*, es decir, siguiendo una perspectiva de abajo a arriba, de manera que la evaluación energética se efectúe sobre una muestra representativa de edificios y las conclusiones se extrapolen a escala urbana.

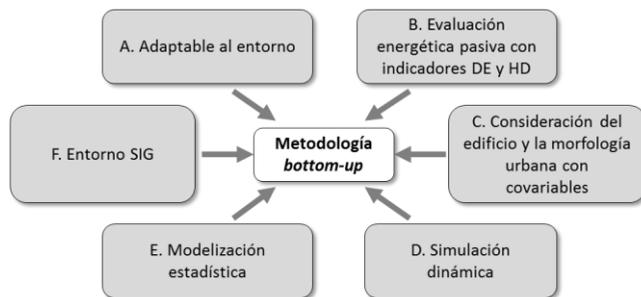


Figura 4.2 Requisitos de la metodología

A continuación, se justifica la necesidad de cada uno de los requisitos y se exponen los fundamentos teóricos tenidos en cuenta para definir cada una de las etapas.

4.2.1 REQUISITO A: ADAPTABLE AL ENTORNO

Como se apunta en las conclusiones del Capítulo 2, cualquier herramienta o metodología debe ser capaz de adaptarse a las características del propio entorno. Retomando el análisis de las HESU, el Capítulo 3 propone una estructura común de comparación de los indicadores contenidos en ellas y la primera categoría, “sitio y suelo”, hace referencia precisamente a este aspecto. Así, una metodología adecuadamente adaptada al entorno debe tener en cuenta criterios como las condiciones climáticas del lugar (aprovechar las condiciones óptimas de topografía, soleamiento o iluminación) o la compacidad, pues las condiciones del entorno son bien diferentes en una ciudad dispersa donde predominan las tipologías de vivienda unifamiliar aislada en una ciudad compacta, en la que predominan los edificios plurifamiliares que conforman manzanas cerradas.

Además, otros aspectos como el contexto socio-económico, histórico o político, pueden también determinar diferencias relevantes que deben ser considerados en el desarrollo de la metodología.

4.2.2 REQUISITO B: EVALUACIÓN ENERGÉTICA PASIVA MEDIANTE LOS INDICADORES ENERGÉTICOS DE Y HD

El parque edificatorio existente debe ser evaluado energéticamente teniendo en cuenta aspectos como la geometría, la orientación de las fachadas de los edificios, los materiales y aislamientos térmicos de los cerramientos y los usos de los espacios, aspectos que darán muestra de su comportamiento energético pasivo.

Se emplearán los cuatro indicadores (o variables respuesta) seleccionados en el Capítulo 3 para evaluar el comportamiento energético pasivo del parque edificatorio. Estos son: la demanda energética de refrigeración (DE_r) y de calefacción (DE_c), y las horas de desconfort de verano (HD_v) y de invierno (HD_i) en evolución libre.

4.2.3 REQUISITO C: CONSIDERACIÓN DEL EDIFICIO Y DE LA MORFOLOGÍA URBANA MEDIANTE COVARIABLES

La metodología integrará las características físicas del entorno edificado, las cuales pueden definirse por las cinco covariables identificadas en el Capítulo 3, manzana urbana (MU), proporción de calle (ratio H/W) y orientación (O), a nivel urbano, y factor de forma (S/V) y año de construcción (A) a nivel de edificio. La definición de estas variables queda descrita en el referido capítulo.

4.2.4 REQUISITO D: SIMULACIÓN DINÁMICA

De la revisión sobre evaluación energética de edificios realizada en el apartado 2.5 del Capítulo 2, se deriva el uso necesario de la simulación dinámica, la cual, en contraposición a los procedimientos estacionarios, ofrece un cálculo mucho más exhaustivo y permite extraer resultados detallados de forma horaria. En cuanto a la herramienta de cálculo empleada para desarrollar la metodología, podría utilizarse cualquiera de las herramientas revisadas que proporcionen los resultados de las variables respuesta.

En este caso, se selecciona el programa EnergyPlus, que funciona como motor de cálculo, y el programa DesignBuilder, que proporciona al anterior una interfaz gráfica, visual e intuitiva. EnergyPlus es capaz de ofrecer como resultado datos sobre confort térmico (número horas de desconfort en evolución libre) y demanda energética (kWh) y de reflejar la realidad del funcionamiento del edificio de una forma detallada, en lo que se refiere a ocupación, horarios de permanencia y cargas internas. El cálculo de transferencia de calor a través de las superficies lo realiza en 3D e incluye una base de datos climáticos que puede ser ampliada por las plantillas que incluye DesignBuilder. Además, por lo que respecta a la evaluación pasiva, EnergyPlus ofrece mejores capacidades que otras herramientas, pues incluye un análisis solar y de sombras muy detallado, tiene en cuenta la masa térmica para el cálculo de cargas y la presión de vapor de los materiales y ofrece amplias posibilidades para incluir diferentes tipos de acristalamiento y protecciones solares. Así, EnergyPlus junto con la interfaz de DesignBuilder consideran todos los aspectos necesarios a incluir en la metodología: clima, cargas energéticas por espacios según el uso de los mismos, consignas de confort ambiental, propiedades de cerramientos y ventanas, sistemas de iluminación y su control en función de la iluminación natural, y la interacción entre todos ellos.

4.2.5 REQUISITO E: MODELIZACIÓN ESTADÍSTICA

Otro de los requisitos que debe satisfacer la metodología es emplear un método para agregar el comportamiento energético del parque edificatorio residencial a una escala urbana, como también se extrae de las conclusiones del Capítulo 2. Para ello, se empleará la modelización estadística para llevar a cabo el tratamiento estadístico de los resultados de la evaluación energética y desarrollar un modelo para agregar o extrapolar los resultados de dicho diagnóstico energético desde la escala de edificio a la escala urbana, siguiendo el enfoque *bottom-up*.

Para ello, se requiere una metodología estadística que permita identificar el nivel de significación de cada una de las covariables y extrapolar el comportamiento energético a un área urbana determinada objeto de estudio.

En este sentido, conocer la dinámica y el comportamiento de un determinado sistema real permite predecir valores considerando el efecto de ciertas variables. Ello se estudia en el marco de la inferencia estadística, utilizando sistemas de ecuaciones diferenciales que permiten predecir valores

teniendo en cuenta la influencia de un conjunto determinado de covariables. Particularmente, este trabajo utiliza inferencia estadística Bayesiana, la cual proporciona un enfoque integrado para realizar inferencia, predicción y tomar decisiones.

Los modelos Bayesianos modernos utilizan métodos de simulación para trazar predicciones de distribuciones. El método *Markov Chain Monte Carlo* (MCMC) se utiliza ampliamente en inferencia Bayesiana, el cual permite tratar conjuntos de datos de naturaleza espacial y espacio-temporal (Blangiardo and Camaletti, 2015). MCMC se combinó con el enfoque *Stochastic Partial Differential Equation* (SPEDE), de cuya unión surge la *Integrated Nested Laplace Approximation* (INLA), un algoritmo determinístico propuesto por Rue y Martino (2007) que probó la obtención de resultados exactos y rápidos. INLA fue iniciado como un programa independiente, pero pronto fue combinado con R (R Development Core Team, 2011), un software computacional estadístico de uso libre, dando lugar a R-INLA *package* (INLA, 2016) (Rue and Martino, 2009a). Desde entonces, R-INLA se ha convertido en un programa popular entre estadistas e investigadores, con aplicaciones de diversa índole, como por ejemplo en los campos de la epidemiología, las ciencias ambientales y las sociales.

El presente trabajo emplea la metodología INLA, a través de R-INLA *package*, con el objetivo de desarrollar un modelo de predicción del comportamiento energético del parque residencial de edificios existente, considerando un conjunto de variables respuesta y covariables determinadas.

Las ventajas que aporta el uso de INLA con respecto a otros métodos, como pueden ser MCMC o los modelos lineales generalizados (*Generalized Linear Models*, GLM), son:

- Tiempos computacionales razonables, que permiten al usuario trabajar con modelos complejos de una forma rápida y eficaz.
- Permite integrar tantas covariables como se desee, pudiendo incorporar a posteriori nuevas covariables en el modelo.
- Permite analizar el nivel de significación de las covariables.
- Al trabajar con inferencia Bayesiana, no requiere trabajar con distribuciones exclusivamente normales.

Mediante la metodología INLA, los datos pueden ser idealizados como realizaciones de un proceso estocástico indexado, según

$$Y(\cdot) \equiv \{y(\cdot) \in R\}$$

donde $y(\cdot)$ es un subconjunto temporal de R .

Los datos pueden ser presentados por un conjunto de observaciones $y = \{y_1, \dots, y_n\}$ (Blangiardo et al., 2013; Camaletti et al., 2013). Una estructura de correlación temporal es una entidad matemática compleja y su estimación práctica es todavía más compleja si las covariables están incluidas (Vlad et al., 2015).

En estadística, para estimar un modelo general, es útil modelar la media de la unidad i -ésimo utilizando un predictor lineal aditivo, definido en una escala adecuada según la expresión:

$$\eta_i = \beta_0 + \sum_{m=1}^M \beta_m z_{mi} + \sum_{l=1}^L f_l(v_{li})$$

donde β_0 es un escalar que representa el intercepto, $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_M)$ son los coeficientes que cuantifican el efecto de las covariables $z = (z_1, \dots, z_M)$ sobre la variable respuesta, y $f = \{f_1(\cdot), \dots, f_L(\cdot)\}$ es un conjunto de funciones definidas en términos de un conjunto de covariables $v = v(v_1, \dots, v_L)$. Desde esta definición, variando la forma de la función $f_i(\cdot)$ se pueden estimar diferentes tipos de modelos, desde regresión estándar *i* jerárquica a modelos espaciales o espacio-temporales (Rue and Martino, 2009b).

Por tanto, se puede definir el modelo si añadimos las covariables oportunas. En el caso que nos atiene, la estructura general del modelo sería

$$\eta_i = \beta_0 + \sum_i \beta_i X_i$$

donde β_i representa el coeficiente que cuantifica el efecto de las covariables en las variables respuesta X_i , ya que no existen en este caso covariables representadas en forma de función.

4.2.6 REQUISITO F: ENTORNO SIG

El último de los requisitos de la metodología se relacionan con el uso de un Sistema de Información Geográfica para su planteamiento, desarrollo e implementación. De la revisión de metodologías se observa que algunos de los modelos hacen uso de SIG, lo que facilita el manejo de un volumen extenso de información y permite también su visualización en mapas.

Son múltiples las definiciones que pretenden explicar el concepto de SIG. Una definición muy precisa y que integra todos los aspectos del SIG tal y como ha evolucionado y como se conoce en la actualidad, es la siguiente: un SIG es un sistema que integra tecnología informática, personas e información geográfica y cuya principal función es capturar, analizar, almacenar, editar y representar datos georreferenciados (Olaya, 2012).

Los SIG permiten introducir información sobre mapas de forma que esta queda almacenada y disponible para ser leída y editada. Además, permiten el análisis de dichos datos, lo que incluye desde consultas sencillas hasta la elaboración de complejos modelos. Gracias a sus funciones, los SIG proporcionan resultados tales como mapas, informes o gráficos, generados a partir de la información almacenada en ellos.

En el caso de proyectos en el ámbito urbano es necesaria la manipulación y el tratamiento de un gran volumen de datos complejos, que definen las características propias de las zonas. Especialmente en estos casos, un SIG constituye una herramienta muy útil para tratar la información densa y extraer conclusiones al respecto. Además, una base de datos basada en un enfoque *bottom-up* permite llevar a cabo acciones FIS (*Forecasting Information Systems*) (Moffatt, 2001), para estimar el comportamiento de los edificios en diferentes escalas espaciales y escenarios temporales. Mientras que los SIG son bidimensionales, los FIS ofrecen un análisis en cuatro dimensiones. Las dos primeras son, como en los SIG, el espacio, la tercera es el comportamiento dinámico de los edificios y la cuarta viene establecida por la evaluación de dicho comportamiento en diferentes momentos temporales. Los escenarios pueden ser condicionados por el desarrollo y crecimiento urbano, y representados alterando los datos del parque edificado. En estos términos, los FIS permiten a los urbanistas, proyectistas y otros agentes intervinientes en el proceso edificatorio, cuantificar y comparar el comportamiento energético de diferentes opciones en el desarrollo urbano. Por

ejemplo, conocer el efecto de un futuro desarrollo urbano en una ciudad o cuantificar el impacto de la implementación de una determinada legislación en materia de eficiencia energética.

Existen diversas herramientas SIG en el mercado, algunas de ellas son de uso libre, como por ejemplo QGIS, GRASS, JUMP, SEXTANTE, gvSIG, y otros requieren de licencia de uso comercial, como ArcGIS, Idrisi TAIGA o Autodesk Map.

En el marco de esta tesis se emplea la herramienta gvSIG Desktop (Asociación gvSIG, 2014) para tratar la información de forma georreferenciada y generar mapas urbanos energéticos que representen los resultados de la evaluación energética del parque edificatorio, es decir, los resultados de las cuatro variables respuesta, DE_r , DE_c , HD_v y HD_i .

Se selecciona la aplicación informática gvSIG Desktop, de uso libre, orientada a representar, editar, analizar y gestionar información desde el punto de vista de las relaciones espaciales. La primera versión de gvSIG surgió en octubre de 2004 y su origen se encuentra en la migración a *software* libre de la *Generalitat Valenciana*. Desde el año 2010 el proyecto es gestionado por la Asociación gvSIG. La versión utilizada en este trabajo es la v1.12. La herramienta está desarrollada bajo los valores de la colaboración y el conocimiento compartido, por lo que ha evolucionado rápidamente y en pocos años se ha convertido en una de las aplicaciones más utilizadas para la gestión de información geográfica.

4.3 JUSTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD DE UNA NUEVA METODOLOGÍA

Como se ha revisado anteriormente, existen ya diversos modelos que proponen metodologías de evaluación energética del parque edificatorio. Sin embargo, ninguno de ellos reúne los seis requisitos identificados como fundamentales. La Tabla 4.1 presenta el alcance de cada uno de los modelos analizados basados en un enfoque *bottom-up*, indicando el cumplimiento o no de los mismos.

Tabla 4.1 Alcance de los modelos *bottom-up* analizados

Referencia	Requisitos de la metodología										
	A	B		C			D	E	F		
	Adaptable al entorno	DE	HD	MU	H/W	O	S/V	A	Simulación dinámica	Modelo de predicción	Entorno SIG
CREEM (Farahbakhsh et al., 1998)							•	•	•		
Huang and Berkeley (2000)		•					•	•	•		
Ren et al. (2012)							•	•	•		
Snäkin (2000)		•					•	•			
BREEHOMES (Shorrock and Dunster, 1997)								•			
Johnston et al. (2005)								•			
UKDCM (Boardman, 2007)								•			
DECarb (Natarajan and Levermore, 2007)		•						•		•	
EEP (Jones et al., 2007)							•	•			•
CDEM (Firth et al., 2010)							•	•			
DECM (Cheng and Steemers, 2011)								•			
VerbCO2M (Hens et al., 2001)							•	•			
TABULA (Dascalaki et al., 2011)	•						•	•			
Dall'O' et al. (2012)	•	•					•	•			•
Caputo et al. (2013)	•						•	•	•		•
Ascione et al. (2013)	•	•					•	•	•		•
SLABE (Mauro et al., 2015)	•	•	•				•	•	•	•	•
Penna et al. (2015)		•	•				•		•	•	
TIMES (Gouveia et al., 2012)		•	•				•	•			
TABULA (Florio and Teissier, 2015)	•						•	•		•	
Fonseca and Schlueter (2015)	•	•					•	•	•	•	•
QuBEC (Aksoezen et al., 2015)	•						•	•			
ECCABS (Mata et al., 2013)		•							•	•	
McKenna et al. (2013)		•					•	•			
TABULA (Instituto Valenciano de la Edificación, 2014)	•						•	•			

En cuanto al requisito A, más de la mitad de los trabajos no presentan una metodología o modelo aplicable en otros contextos. Mayoritariamente, las metodologías se desarrollan específicamente para el entorno edificado en el que se aplican, a través de un caso de aplicación que puede alcanzar la escala de barrio, ciudad o incluso país o región. Y ello representa precisamente un hándicap, al no poder ser replicada en otras localizaciones. Cabe recordar que, como se extrajo de la revisión de herramientas de evaluación de la sostenibilidad urbana realizada en el Capítulo 2, una herramienta debe ser adaptable al contexto en el que se implementa, el cual, puede ser muy variable incluso en el contexto de un mismo país. Por ello, es importante el potencial de desarrollar una metodología general, aplicable a diferentes contextos. Entre los modelos que cumplen el requisito A, algunos de ellos (Dascalaki et al., 2011; Florio and Teissier, 2015; Instituto Valenciano de la Edificación, 2014) están basados en el proyecto TABULA, por lo que proponen una caracterización armonizada de las

tipologías edificatorias, en un amplio rango de países europeos. En el resto de los casos que reúnen el requisito A, se establece una metodología genérica que sí puede ser extrapolada en otros contextos y la desarrollan a través de un caso de aplicación.

El requisito B es satisfecho parcialmente por, aproximadamente, la mitad de los modelos, que integran la demanda energética como indicador de evaluación, proporcionando una estimación del comportamiento pasivo de los edificios. No obstante, el indicador de confort térmico, únicamente es considerado en tres de ellos (Gouveia et al., 2012; Mauro et al., 2015; Penna et al., 2015), que tal y como se ha justificado anteriormente, resulta un indicador complementario al anterior para evaluar el comportamiento energético pasivo.

En cuanto al requisito C, se aprecia que las covariables relativas al entorno urbano son prácticamente obviadas en los modelos. Únicamente Ascione et al. (2013), Caputo et al. (2013) y Mauro et al., (2015) tienen en consideración la orientación como factor influyente en el comportamiento energético. Las covariables manzana urbana (MU) y proporción de calle (H/W) son obviadas por todos los modelos, constituyen una aportación la metodología propuesta en este trabajo. Por el contrario, las variables a nivel de edificio son ampliamente abordadas por la mayoría de los modelos. Tanto la tipología (a través de S/V) como la transmitancia térmica de la envolvente (a través del año de construcción, A), son empleados para clasificar el parque edificado.

La simulación dinámica, que comprende requisito D, es adoptada por nueve de los modelos. Estos confían en herramientas reconocidas internacionalmente como es EnergyPlus o TRNSYS. Sin embargo, el resto de los modelos emplean programas simplificados de evaluación desarrollados en el propio país donde se aplica el modelo, como respuesta al cumplimiento de la normativa relativa a ahorro de energía y certificación energética. Es el caso de TEE-KENAK en Grecia (Dascalaki et al., 2011), CENED+ en la región Lombardi de Italia (Dall'O' et al., 2012), ETSAP en Portugal (Gouveia et al., 2012) o CERMA en España (ATECYR and Universidad Politécnica de Valencia, 2011). La utilización de programas no dinámicos no es apropiada para analizar el funcionamiento pasivo del parque edificado, ya que no permite realizar un análisis horario, de temperaturas y del nivel de desconfort para los ocupantes. Así, la utilización de programas específicos hace compleja la aplicación de las diferentes metodologías en otras regiones, precisamente porque muchos de ellos utilizan herramientas propias desarrolladas en el país.

El requisito E, se refiere al método empleado para la predicción del comportamiento energético de la totalidad del parque edificado. Este aspecto, recogido en la Tabla 2.5 del Capítulo 2, puede estar basado en tres enfoques, extrapolación, bases de datos o método de predicción, como se vio en el referido capítulo. La mayoría de los modelos revisados se basan en los dos primeros y confían la agregación de resultados desde la escala de edificio a la escala urbana, por simple extrapolación de los resultados obtenidos de la evaluación de un conjunto de edificios representativos (generalmente definido únicamente por su tipología edificatoria). Los valores de los indicadores energéticos se utilizan como referencia y se asumen los mismos para todos los edificios contenidos dentro de una misma tipología de edificio. En la Tabla 4.1 únicamente se puntúan los modelos basados en un modelo de predicción complejo, pues se considera que los otros dos enfoques no aportan novedad a las metodologías. Únicamente los trabajos realizados por Florio y Teissier (2015), Mata et al. (2013), Mauro et al. (2015), Natarajan y Levermore (2007) y Penna et al. (2015), se alejan de estos enfoques más simplificados y desarrollan específicamente modelos más complejos de predicción.

Por último, el requisito F es cumplido por Ascione et al. (2013), Caputo et al. (2013), Dall'O' et al. (2012), Fonseca y Schlueter (2015), Jones et al. (2007), quienes integran el entorno SIG en sus metodologías. Puede decirse que, a pesar del enriquecimiento que aporta la visualización de los resultados en mapas, los SIG tienen un bajo nivel de implementación en los modelos.

Por tanto, ninguna de las herramientas *bottom-up* desarrolladas hasta la fecha integra los seis requisitos en la metodología que se propone, cuya originalidad y novedad radica en:

- Metodología genérica. La metodología proporciona las pautas y los procedimientos necesarios para implementar la metodología en otros contextos geográficos (país, región, ciudad o barrio).
- Enfoque urbano. Para realizar la evaluación energética se tiene en consideración la influencia del contexto urbano, no únicamente el edificio como elemento aislado. La mayoría de modelos analizados determinan unos valores de referencia para las variables energéticas para un conjunto de tipologías edificatorias representativas, mediante un método de cálculo de régimen estacionario o dinámico, y extrapolan dichos valores al conjunto de edificios que conforman un *stock*. La presente metodología tiene en cuenta, además de la tipología edificatoria, un conjunto de covariables urbanas determinadas por la configuración del entorno construido, que, al igual que el edificio, tienen una influencia significativa en el comportamiento energético del parque edificado.
- Evaluación energética pasiva. La metodología pretende evaluar el comportamiento energético pasivo del parque edificado, a través de los indicadores de demanda energética y confort térmico.
- Inferencia estadística. Para realizar el proceso de extrapolación del diagnóstico energético a escala urbana se desarrolla un modelo de predicción de las variables energéticas o indicadores (DE_e , DE_c , HD_e y HD_i) basado en la inferencia estadística, que integra tanto las covariables a nivel de edificio como a nivel urbano. Así, el valor de los indicadores energéticos puede predecirse para cada edificio que conforma el parque, de forma individualizada y pormenorizada.
- Entorno SIG. La metodología se desarrolla a través de un Sistema de Información Geográfica, que permite plasmar los resultados en mapas energéticos urbanos.

4.4 ESTRUCTURA DE LA METODOLOGÍA

La metodología propuesta se basa en un enfoque *bottom-up* y combina dos técnicas propias de dicho enfoque para llevar a cabo la evaluación energética de edificios:

- Técnica de ingeniería: simulación energética de las condiciones físicas y térmicas de un conjunto de edificios de referencia representativos del parque existente, y
- Técnica estadística: inferencia estadística para el desarrollo de un modelo de predicción de la demanda energética y las horas de desconfort de los edificios que forman parte de un área urbana consolidada.

El marco metodológico consiste en cuatro etapas principales, descritas en la Figura 4.3, desde la parte inferior (Etapa I) a la superior (Etapa IV). Los cuadros de texto sombreados representan los resultados que se obtienen de cada etapa y que sirven como información de entrada para la siguiente. En la parte izquierda, se detallan las herramientas informáticas seleccionadas para desarrollar cada una de las etapas.

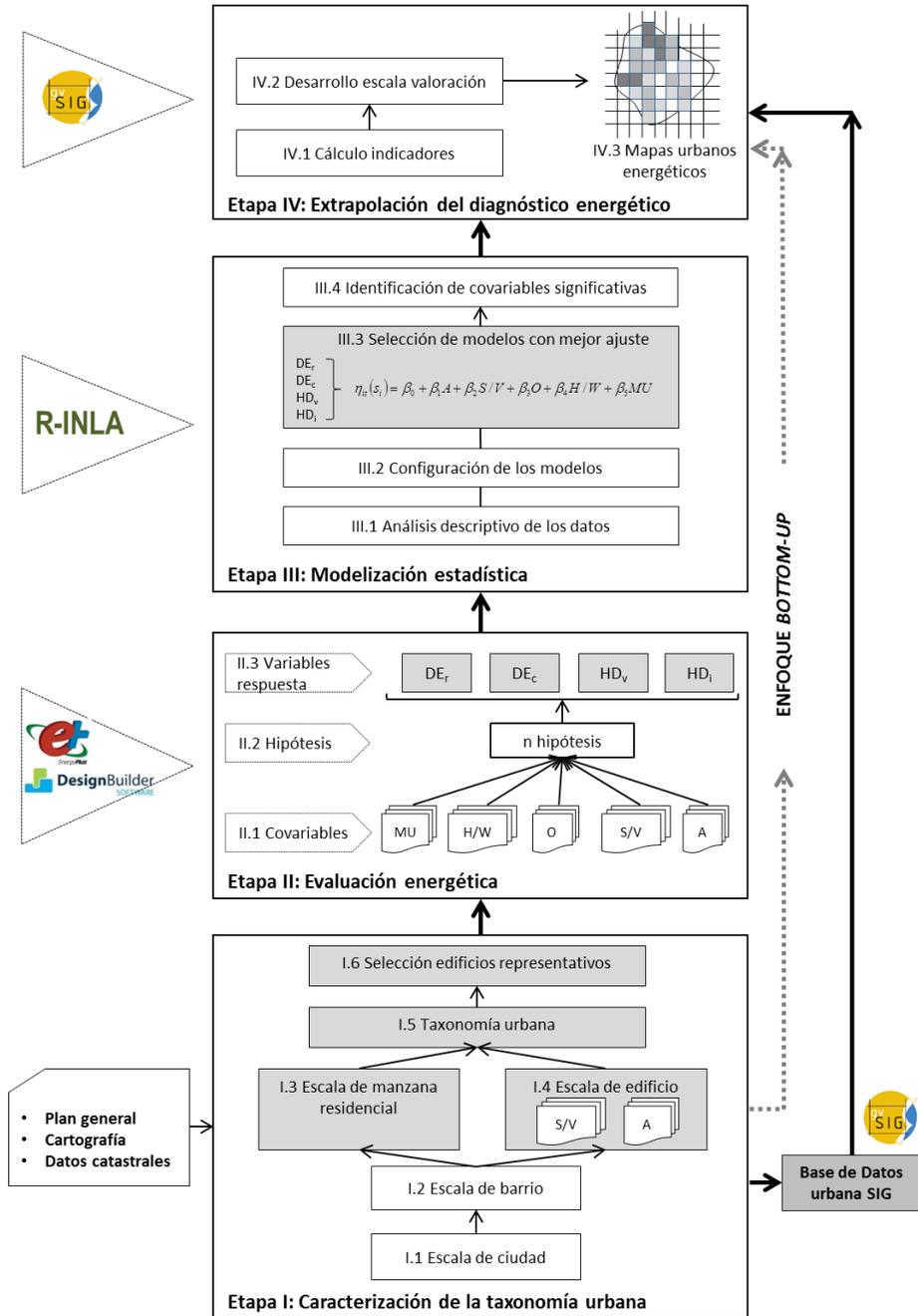


Figura 4.3 Etapas de la metodología propuesta

- **Etapa I: Caracterización de la taxonomía urbana.** El parque de edificios residencial se desglosa según su taxonomía en cuatro escalas, desde la más amplia a la más concreta: ciudad, barrio, manzana urbana residencial y edificio. Para llevar a cabo la clasificación, se requiere recabar información sobre el Plan General de Ordenación Urbana (PGOU) de la ciudad, la cartografía y datos catastrales actualizados. El uso de la tecnología SIG resulta especialmente útil en esta etapa, ya que permite generar una base de datos de información urbana georreferenciada, también necesaria en el desarrollo de etapas posteriores. En esta etapa se define el conjunto de los valores para las covariables (MU, H/W, O, S/V y A) que adoptan específicamente para el área urbana objeto de estudio. Como resultado de la etapa se obtiene un conjunto de tipologías de manzana residencial y de tipologías edificatorias características del área urbana, que definen su taxonomía, y se selecciona un conjunto de edificios muestra representativos que serán objeto de evaluación energética en la Etapa II.
- **Etapa II: Evaluación energética.** En esta etapa, los edificios representativos del área urbana objeto de estudio son evaluados energéticamente, dentro de su contexto urbano. Mediante la combinación de las covariables se obtiene un conjunto de hipótesis, que serán objeto de simulación. Los resultados de simular las hipótesis de cálculo generarán los valores de las variables respuesta (DE_r , DE_c , HD_v y HD_i), los cuales proporcionarán un diagnóstico energético del comportamiento pasivo de dichas hipótesis.
- **Etapa III: Modelización estadística.** Los resultados obtenidos en la Etapa II son procesados y analizados estadísticamente, lo que permite cuantificar el efecto de cada covariable sobre las variables respuesta. Esta etapa tiene como resultado un conjunto de cuatro ecuaciones matemáticas que permiten predecir, mediante inferencia estadística Bayesiana, los valores de las variables respuesta para cada edificio individual que forme parte del área urbana bajo estudio.
- **Etapa IV: Extrapolación del diagnóstico energético a escala urbana.** Una vez obtenidas las ecuaciones para las variables respuesta, el comportamiento energético del conjunto de edificios incluidos en el área urbana objeto de estudio puede ser estimado mediante predicción, en función de los parámetros urbanos y del edificio (valores que adoptan en cada caso las covariables). Los resultados son agregados de abajo hacia arriba, siguiendo el enfoque *bottom-up*, y son así extrapolados desde la escala individual del edificio a la escala urbana. La tecnología SIG posibilita esta etapa y permite la representación gráfica de los resultados en mapas urbanos energéticos.

Así pues, la Etapa I constituye la recogida de información y la identificación previa de la realidad del área urbana objeto de estudio. Las Etapas II y III constituyen la fase experimental de la investigación, en la que las variables seleccionadas son analizadas de forma física y estadística. La Etapa IV deja atrás la fase experimental para retomar de nuevo la realidad urbana del entorno en el que se aplica la metodología y agregar los resultados obtenidos en las fases anteriores para extrapolarlos a una escala urbana.

4.5 ETAPA I: CARACTERIZACIÓN DE LA TAXONOMÍA URBANA

El objetivo de esta etapa es caracterizar el parque residencial de edificios existente en tipologías de edificios y tipologías de manzana urbana. La Figura 4.4 muestra el diagrama de caracterización en las cuatro escalas fundamentales, de la más general a la más particular: escala de ciudad, escala de barrio, escala de manzana residencial y escala de edificio.

Dentro de las escalas de ciudad y de barrio, la Figura 4.4 indica los patrones de morfología urbana predominantes y ejemplos de los tipos de barrios que podrían encontrarse en cualquier ciudad. Dentro de la escala de manzana residencial, se indican los criterios de selección para caracterizar las tipologías de manzana, y dentro de la escala de edificio, los criterios para caracterizar las tipologías edificatorias. Una vez se alcanza la última escala, la de edificio, se seleccionan unos edificios muestra que son representativos del parque edificatorio, lo que ayudará a simplificar el proceso de evaluación energética en la Etapa II.

Además del procedimiento para la caracterización de la taxonomía urbana, como resultado de esta Etapa I, se obtiene el procedimiento para crear una base de datos SIG donde toda la información urbana quede georreferenciada en la cartografía de la ciudad. Tener la información georreferenciada permite en esta etapa, por último, asociar las tipologías edificatorias a las tipologías de manzana, de manera que el parque edificatorio puede ser cuantificado según su taxonomía y los patrones de manzanas tipo pueden ser identificados dentro del área de estudio.

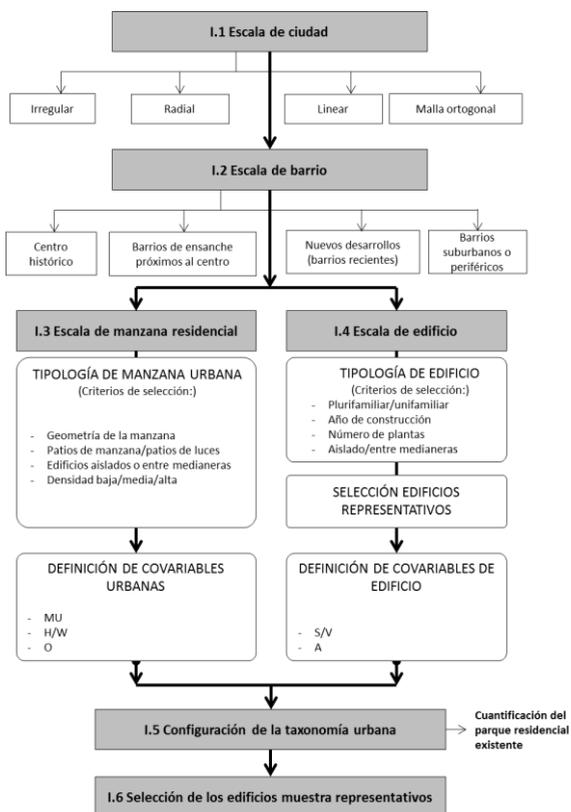


Figura 4.4 Procedimiento para la caracterización de la taxonomía urbana

4.5.1 I.1 ESCALA DE CIUDAD: IDENTIFICACIÓN DE PATRONES URBANOS

En la escala de ciudad se identifica la configuración urbana de la misma. Resulta complejo describir todas las morfologías urbanas existentes, pero según Marshall (2005), existen cuatro trazados urbanos de presencia habitual en la ciudad.

- **Irregular:** consiste en una red desorganizada de arterias que no conforman ningún patrón específico. Es característico de los centros históricos donde los inicios del desarrollo urbano no venían marcados por ninguna ordenación urbana específica.
- **Radial o radiocéntrico:** organiza la ciudad mediante una estructura ramificada que parte de un centro neurálgico, recordando a la estructura conformada por la copa de un árbol.
- **Lineal:** consiste en una estructura predominantemente longitudinal donde se diversifican lateralmente ramificaciones poco extensas, recordando a la espina de un pez.
- **Reticula ortogonal:** organiza las calles en líneas paralelas y perpendiculares de manera que se encuentran en ángulos rectos, formando una estructura ortogonal.

La Figura 4.5 muestra cuatro ejemplos de ciudades españolas o barrios específicos que atienden a estos cuatro trazados urbanos.

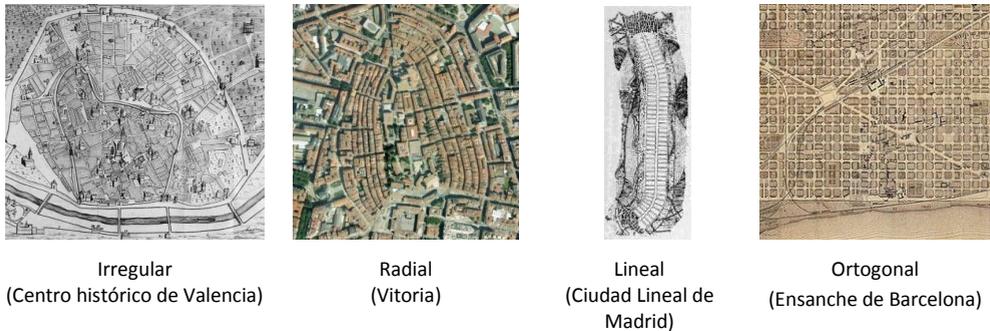


Figura 4.5 Ejemplos de ciudades con trazados urbanos característicos de la ciudad española

Las particularidades geométricas de una ciudad pueden ser estudiadas mediante el análisis de la cartografía disponible y el PGOU. Ambos aportan la información necesaria para desmenuzar el trazado urbano e identificar los patrones urbanos que conforman la ciudad, atendiendo a su configuración urbana.

4.5.2 I.2 ESCALA DE BARRIO: IDENTIFICACIÓN DE TIPOS DE BARRIOS

Dentro de una ciudad, los barrios conforman sistemas urbanos de menor escala que funcionan como pequeñas ciudades. Desde el punto de vista del trazado urbano, los barrios se componen de un conjunto de manzanas de características geométricas similares que juntas le confieren cierta identidad. Por otro lado, desde el punto de vista socio-económico y socio-demográfico, los barrios suelen estar integrados por población con similar poder adquisitivo, factor que contribuye a definir su carácter, los hábitos de sus habitantes y las actividades que en él se desarrollan, lo que influye a su vez en los patrones de comportamiento que derivan en necesidades energéticas concretas.

En general, se pueden distinguir cuatro tipos de barrios atendiendo a las razones históricas que condicionan la evolución del trazado urbano y su morfología. Éstas se describen a continuación:

- **Centro histórico:** formado por el casco histórico tradicional de la ciudad que marcaba los primeros asentamientos urbanos y que, habitualmente en ciertos momentos históricos, estuvo delimitado por murallas de la Edad Media que constituyeron una barrera a su expansión, originando un trazado urbano propio que perdura hoy todavía en muchos casos inamovible en el tiempo. Esta tipología de barrio está caracterizada por una estructura irregular en la que la organización de las manzanas da lugar a una configuración anárquica, sin patrones claramente definidos. Las calles tienden a ser estrechas y de anchos variables, y los edificios se erigen con alturas no siempre homogéneas; factores que dan lugar a obstrucciones solares frecuentes en las fachadas de los edificios que recaen a dichas calles. La tipología edificatoria típica en los centros históricos son las viviendas unifamiliares entre medianeras y los edificios plurifamiliares, también entre medianeras, con patios de luces pequeños, lo que da lugar a manzanas sin grandes patios internos.
- **Barrios de ensanche:** situados en las proximidades de los centros históricos y originados durante las primeras expansiones de la ciudad. Generalmente, su trazado urbano ya fue concebido por un planeamiento urbano que establecía ciertas ordenanzas urbanísticas, originando pues, estructuras urbanas mejor organizadas que habitualmente resultaban en retículas de geometría más regular que los anteriores. La tipología predominante en los ensanches son los edificios plurifamiliares de viviendas, en algunos casos, combinados con antiguas viviendas unifamiliares procedentes de los primeros amagos de expansión de la ciudad, todos ellos entre medianeras. Las calles son más anchas y los edificios son de mediana altura, lo que desemboca en densidades urbanas altas. En los barrios de ensanche se encuentran habitualmente manzanas urbanas cerradas de grandes dimensiones con patios internos de dimensiones considerables que favorecen la entrada de luz y la ventilación en las fachadas posteriores de los edificios que recaen en estos patios de manzana.
- **Nuevos desarrollos urbanos:** formados por nuevos barrios de más reciente construcción dirigidos a una población de poder adquisitivo medio y alto. En ellos abundan los edificios plurifamiliares en altura y en condominio cerrado (con zonas comunes como parques infantiles, piscinas o zonas deportivas propias) y viviendas unifamiliares aisladas, pareadas o adosadas en hilera. Generalmente las calles son anchas, lo que contribuye a disminuir las obstrucciones solares. Se caracterizan por tener una densidad media o baja.
- **Barrios suburbanos o periféricos:** distribuidos en zonas periféricas de la ciudad, suelen conformar pequeñas zonas suburbanas con población de bajo poder adquisitivo. Habitualmente se encuentran en ellos tipologías de vivienda unifamiliar entre medianeras conformando pequeñas manzanas urbanas, o edificios plurifamiliares de mediana altura, lo que da lugar a densidades medias o bajas.

4.5.3 I.3 ESCALA DE MANZANA URBANA: IDENTIFICACIÓN DE PATRONES DE MANZANA

Dentro del barrio, cada manzana puede estar constituida por un grupo de edificios dispuestos de una determinada forma que le confiere la geometría a la manzana. Su geometría depende de parámetros como:

- Forma de las calles (anchura y longitud) y altura de los edificios
- Existencia de patios interiores de luces y/o patios de manzana

- Edificios aislados o entre medianeras
- Densidad alta, media o baja

En términos generales, la clasificación siguiendo estos parámetros resulta en manzanas lineales, irregulares, cuadradas o rectangulares, o edificios aislados que conforman por sí solos una única manzana. Los patios de manzana y los patios de luces juegan un papel muy importante en el soleamiento, la ventilación y la iluminación natural, factores que, como se ha apuntado anteriormente, condicionan enormemente el comportamiento energético de los edificios.

Para identificar las tipologías de manzana, se deberá analizar pormenorizadamente la trama urbana de la ciudad, a través de su PGOU y cartografía.

4.5.4 I.4 ESCALA DE EDIFICIO: IDENTIFICACIÓN DE TIPOLOGÍAS EDIFICATORIAS

Las tipologías de edificios también contribuyen a definir el paisaje urbano característico de la ciudad. De acuerdo con lo expuesto en el Capítulo 3, la tipología edificatoria se define mediante dos covariables: factor de forma (S/V) y año de construcción (A).

El factor de forma viene determinado por la morfología del edificio y se clasifica en función de tres aspectos:

- Ocupación: edificio plurifamiliar o unifamiliar
- Número de plantas: número de plantas sobre rasante, incluyendo la planta baja
- Adyacencia: edificio aislado o entre medianeras

Los tres criterios anteriores definen las dimensiones y morfología del edificio, referidas como la clase, y se pueden expresar de forma numérica mediante el factor de forma (S/V). Los edificios plurifamiliares implican mayor tamaño que las viviendas unifamiliares, lo que hará que ambas tipologías tengan distintas ratios S/V . Por otro lado, el número de plantas también condiciona el tamaño del edificio, modificando así su S/V . Y, por último, el nivel de adyacencia influirá en el intercambio de calor entre el interior del edificio y el ambiente exterior, pues un edificio aislado tiene mayor porcentaje de superficie de envolvente en contacto con el exterior que un edificio entre medianeras.

La segunda de las covariables, el año de construcción (A), concluye la definición de la tipología edificatoria. El año de construcción se identifica mediante la delimitación en los periodos temporales que comprenden hitos históricos y normativos relevantes, que marcan el paso del tiempo. Estos llevan implícito el tipo de solución constructiva empleada para ejecutar el edificio, por lo que se asociarán con un valor de transmitancia térmica para cada uno de los cerramientos del edificio.

Los periodos temporales pueden ser definidos por épocas en las que se empleaban técnicas de construcción similares, atendiendo a tres razones principales:

- Soluciones constructivas típicas. Vienen determinadas según la antigüedad del edificio, la cual condiciona las técnicas constructivas empleadas con el paso del tiempo.
- Hitos históricos. Situaciones políticas o históricas han marcado momentos relevantes en el tiempo, condicionando la manera de construir.
- Normativa de edificación en materia de eficiencia energética en edificación. La entrada en vigor o modificación de ciertas legislaciones imponen cambios que suponen puntos de inflexión en el uso de aislamiento térmico en la edificación. Con el paso del tiempo, la

normativa endurece los requisitos y las exigencias de aislamiento térmico se ven incrementadas.

De esta manera, los periodos de construcción se caracterizan mediante la asociación de una U a cada uno de los elementos que componen la envolvente térmica del edificio. Así, es posible crear un paquete de soluciones constructivas típicas asignando un valor de transmitancia térmica para cada una de ellas y para cada uno de los periodos temporales identificados. Con ello, puede elaborarse una tabla con las características contenidas en la Tabla 4.2, expuesta de forma genérica.

Tabla 4.2 Paquete de valores de transmitancias térmicas (U) para cada periodo temporal constructivo

Elemento de la envolvente	U (W/m ² K)			
	Periodo 1	Periodo 2	...	Periodo n
Fachada U _F				
Cubierta U _C				
Medianeras U _M				
Suelo U _S				
Cerramientos con terreno U _T				
Huecos U _H				
Puentes térmicos U _{PT}				

El cruce de ambas covariables, S/V y A, dará lugar a una matriz de tipologías de edificios, tal y como se muestra en la Figura 4.6, la cual muestra el esquema conceptual para la caracterización y la obtención final de una matriz final de tipologías edificatorias.

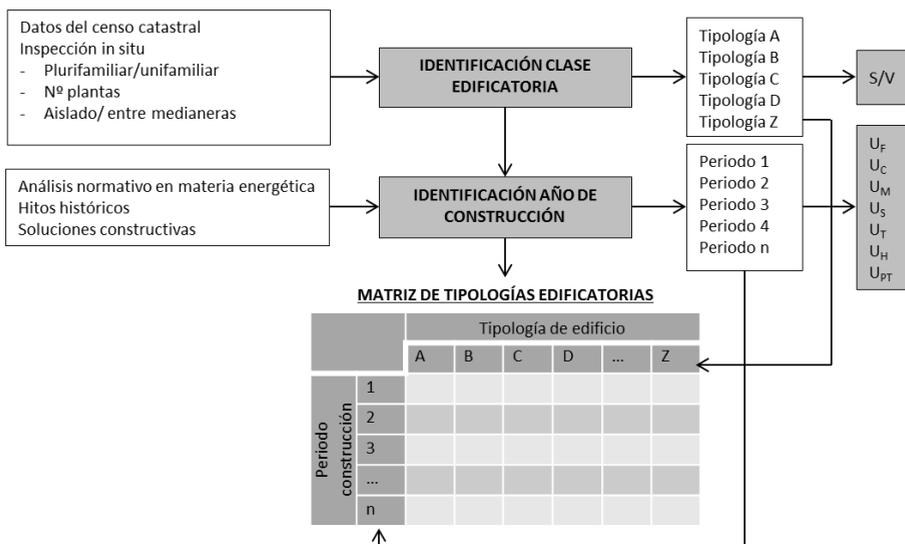


Figura 4.6 Metodología para la caracterización de la tipología edificatoria

4.5.5 I.5 CONFIGURACIÓN DE LA TAXONOMÍA URBANA REPRESENTATIVA

Llegados a este punto, cabe indicar que las tipologías de edificios y las de manzana no funcionan de forma independiente, sino que están íntimamente relacionadas entre sí. Como se observa en la Figura 4.7, un determinado barrio contendrá unas tipologías de manzana concretas y, a su vez, estas contendrán unas tipologías edificatorias. Por ejemplo, una vivienda unifamiliar aislada nunca la encontraremos en una manzana urbana cerrada, donde todos los edificios presentes en ella serán entre medianeras, y así vendrá determinado en el PGOU de la ciudad. Sin embargo, sí podremos encontrar viviendas unifamiliares o plurifamiliares (ambas entre medianeras) de diferente número de plantas. Por ello, será necesario identificar las manzanas tipo presentes en el área urbana objeto de estudio y las tipologías edificatorias que tienen asociadas.

Una vez definida la taxonomía urbana en una determinada área urbana (barrio, ciudad, etc.), a través de la herramienta SIG, podrá realizarse dicha asociación, de manera que las manzanas tipo en el área de estudio podrán ser identificadas.

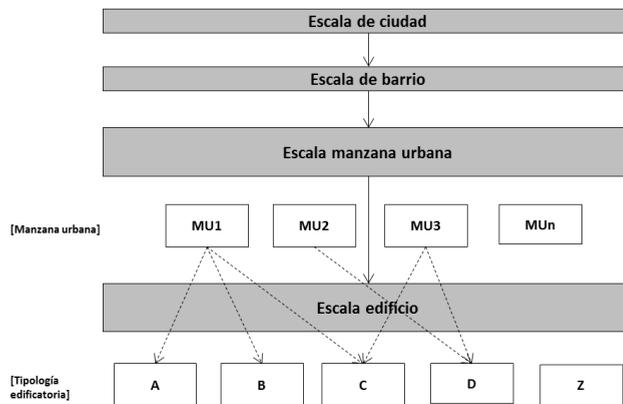


Figura 4.7 Procedimiento de asociación de tipologías edificatorias a tipologías de manzana urbana

4.5.6 I.6 SELECCIÓN DE LOS EDIFICIOS REPRESENTATIVOS

De cada una de las clases de edificios identificadas se selecciona un edificio que sea representativo. Para que los edificios representen correctamente a todos los de su clase, la selección se efectuará según los siguientes criterios:

- De las clases de edificios presentes en el área urbana objeto de estudio, se seleccionará un edificio real del periodo temporal predominante, es decir, el que presente mayor número de edificios construidos.
- El edificio seleccionado debe atender a su clase (mismo tipo de ocupación, número de plantas y adyacencia) y tener una superficie construida aproximada a la superficie media de todos los edificios de su tipología edificatoria.

Estos edificios deben ser exhaustivamente analizados y descritos en detalle, para representar de forma fiable al espectro de edificios de su misma clase (tamaño, características físicas, zonificación, perfil de uso, etc.). Los edificios muestra representativos serán objeto de simulación energética en la Etapa II.

4.5.7 CREACIÓN DE UNA BASE DE DATOS EN ENTORNO SIG

En esta Etapa I, el uso de una herramienta SIG permite taxonomizar un parque edificatorio residencial consolidado. La creación de una base de datos SIG representa una acción transversal en la metodología, que será no sólo necesaria en esta etapa, sino también en la Etapa IV, para realizar el diagnóstico energético del entorno urbano y generar los mapas energéticos urbanos.

Para poder evaluar energéticamente un entorno urbano consolidado integrado por multitud de edificios, resulta necesario conocer el número de edificios que compone cada una de las tipologías edificatorias, así como conocer su superficie construida. Con las tipologías definidas en la matriz de clases de edificios obtenida anteriormente, quedará representado todo el conjunto del parque edificatorio residencial existente del área urbana objeto de estudio. Identificando edificios representativos en cada una de las clases y evaluando éstos a nivel individual, los resultados podrán extrapolarse a escala urbana y predecir así el comportamiento energético de todo un barrio o incluso de toda una ciudad, siguiendo un enfoque *bottom-up*.

Los datos necesarios para poder clasificar a los edificios (antigüedad, clase edificatoria, número de plantas, superficie, etc.) son datos disponibles que pueden ser obtenidos de la Dirección General del Catastro (DGC, 2014) a través de su base de datos georreferenciada en base a la referencia catastral. La introducción de dichos datos en una herramienta SIG permite clasificar a los edificios de una determinada zona urbana en las tipologías edificatorias contenidas en la matriz, conocer el número que integra cada una de estas tipologías y, por último, visualizar dicha información en un mapa urbano. La información previa que es necesario recabar para constituir la base de datos en SIG queda resumida en la Figura 4.8. La Tabla 4.3 muestra un ejemplo de la información contenida en cada una de las columnas de la tabla de atributos a incorporar en la herramienta SIG, la cual contiene la información asociada a las parcelas catastrales y podrá ser interpretada por un SIG para generar mapas georreferenciados.

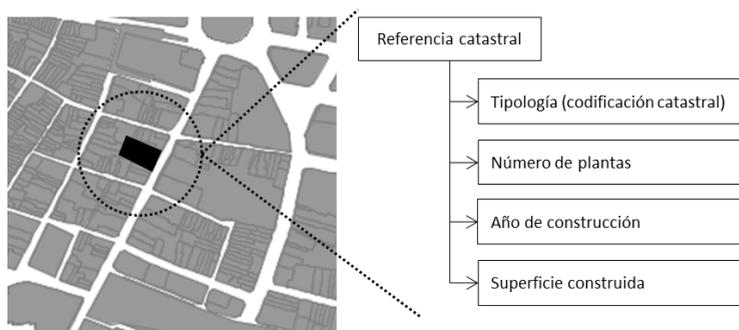


Figura 4.8 Información necesaria para cada parcela catastral

Tabla 4.3 Ejemplo de información de entrada (tabla de atributos) para la creación de la base de datos SIG proporcionada por la DGC

Referencia catastral	Tipología (codificación catastral)	Número de plantas	Año de construcción	Superficie construida
3807601YK5330N0008TA	111 (Ver Tabla 4.4)	IV	1976	19.592 m ²

La codificación empleada por la DGC para definir la tipología edificatoria hace referencia al uso principal al que está destinado el edificio y a su morfología (edificios plurifamiliares o unifamiliares, edificación abierta o en manzana cerrada, etc.). La codificación para los edificios de uso residencial, objeto de estudio en este trabajo, que emplea la DGC española queda reflejada en la Tabla 4.4. Determinados edificios pueden contener diferente codificación, en el caso de estar destinados a usos diversos (por ejemplo, un edificio plurifamiliar de viviendas con un local comercial en planta baja). Se deberá prestar especial atención en estos casos, para asignar el código correcto a la totalidad del edificio.

Tabla 4.4 Codificación de tipologías edificatorias según Dirección General del Catastro español (DGC, 2014)

Codificación edificios uso residencial		
1.1 Viviendas colectivas de carácter urbano	1.1.1 Edificación abierta	
	1.1.2 En manzana cerrada	
	1.1.3	Garajes
		Trasteros
1.2 Viviendas unifamiliares de carácter urbano	1.2.1 Edificación aislada o pareada	
	1.2.2 En línea o manzana cerrada	
	1.2.3	Garajes
		Porches en planta baja

La introducción de esta información catastral concreta de una determinada zona urbana en una herramienta SIG, permitirá obtener la taxonomía edificatoria y determinar el número de edificios que responden a cada una de las tipologías.

4.6 ETAPA II: EVALUACIÓN ENERGÉTICA

Esta segunda etapa de la metodología tiene por objeto establecer el procedimiento para llevar a cabo la evaluación energética pasiva de edificios, que permitirá determinar los valores de las cuatro variables respuesta en los edificios muestra representativos: demanda energética de refrigeración (DE_r), demanda energética de calefacción (DE_c), horas de desconfort en verano (HD_v) y horas de desconfort en invierno (HD_i).

Tal y como se ha indicado en el requisito D, la herramienta de cálculo adecuada es EnergyPlus (U.S. Department of Energy, 2013) con la interfaz gráfica de DesignBuilder (DesignBuilder UK, 2015), por presentar mejores capacidades para analizar el comportamiento energético pasivo del parque edificado.

Seleccionada el área urbana objeto de estudio e identificados los edificios representativos de cada tipología (A, B, C,..., Z), estos serán evaluados energéticamente en su contexto urbano. La evaluación energética de los edificios representativos contribuye a simplificar el proceso de evaluación de un parque edificatorio, el cual, aun así, resulta complejo. Esta simplificación se asume para canalizar las posteriores etapas de la metodología, y extrapolar finalmente los resultados de una muestra representativa desde la escala individual de edificio a la escala de ciudad.

Esta etapa se estructura en tres sub-etapas, tal y como se detalla en los siguientes apartados.

4.6.1 II.1 DEFINICIÓN DE LAS COVARIABLES

Para cada edificio representativo se definen los valores de las covariables, tanto a nivel de edificio como a nivel urbano, según las características físicas del entorno. Así, se obtendrá un abanico de posibles hipótesis por combinación de todas ellas, como se analizará en el siguiente apartado.

En el Capítulo 3 se han definido las tres covariables que establecen los parámetros necesarios para definir las tipologías de manzana y sus condicionantes del entorno urbano. Estas son:

- Patrón de manzana urbana (MU)
- Ratio altura-anchura de calle (H/W)
- Orientación solar de la fachada principal (O)

A nivel de edificio, también en el Capítulo 3, se han definido las dos covariables que caracterizan la tipología edificatoria:

- Factor de forma (S/V)
- Año de construcción (A)

Los valores de las cinco covariables deberán ser definidos para las tipologías de manzana y de edificio identificadas en el área urbana objeto de estudio.

4.6.2 II.2 PLANTEAMIENTO DE LAS HIPÓTESIS DE CÁLCULO

La Figura 4.9 presenta el diagrama de flujo para el planteamiento de hipótesis objeto de evaluación energética, a partir de la identificación de la taxonomía representativa.

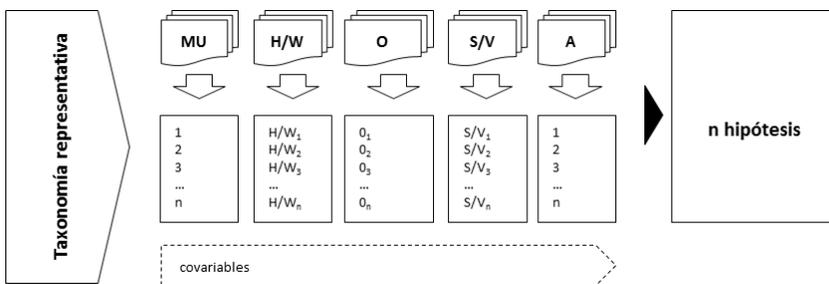


Figura 4.9 Procedimiento a seguir para el planteamiento de las hipótesis objeto de simulación energética

El número de hipótesis a conformar para cada edificio representativo vendrá dado por el número de posibles combinaciones entre todas las covariables, según la expresión:

$$N_{hipótesis} = n_{MU} \times n_{H/W} \times n_O \times n_{S/V} \times n_A$$

4.6.3 II.3 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CÁLCULO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS VARIABLES RESPUESTA

Conformadas las hipótesis de cálculo, se procede a la simulación energética dinámica. Para que los resultados de todas las hipótesis sean objetivamente comparables, los parámetros de entrada en la simulación de las hipótesis deben ser los mismos en todas ellas. Solamente así podrá determinarse la influencia que cada covariable tiene en la demanda energética y las horas de disconfort.

Así pues, deben definirse los parámetros en relación a las condiciones climáticas, densidad de ocupación, patrones de comportamiento de los ocupantes, tasas metabólicas y nivel de vestimenta, temperaturas de consigna, ganancias internas, condiciones de soleamiento y sombras, tasa de infiltración de aire y demanda de ACS, según se describe en el apartado 2.5.1 del Capítulo 2.

Tras simular las hipótesis, se obtienen los valores de las variables respuesta para cada una de las hipótesis planteadas, estas son:

- Demanda energética de refrigeración (DE_r , kWh/m²año)
- Demanda energética de calefacción (DE_c , kWh/m²año)
- Horas de disconfort en verano (HD_v , horas/año)
- Horas de disconfort en invierno (HD_i , horas/año)

4.7 ETAPA III: MODELIZACIÓN ESTADÍSTICA

Obtenidos los valores de las variables respuesta para cada una de las hipótesis planteadas, el objetivo de esta tercera etapa de la metodología es configurar un modelo de predicción que permita estimar las variables respuesta en un parque edificatorio consolidado, mediante inferencia estadística. Como se cita anteriormente en el requisito E de la metodología, se hará uso del método R-INLA para obtener las cuatro ecuaciones matemáticas que integren las covariables identificadas.

La Figura 4.10 establece el enfoque seguido para el desarrollo del modelo de predicción.

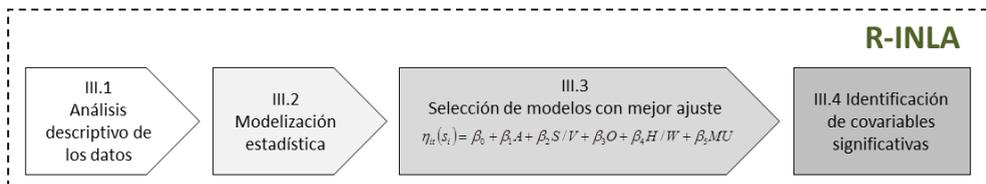


Figura 4.10 Enfoque metodológico para la modelización estadística

4.7.1 III.1 ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LOS DATOS

Los datos obtenidos de las simulaciones marcan el punto de partida de la modelización estadística. Estos deben ser tratados estadísticamente, de forma numérica y gráfica. Para ello, se estudian las medias, medianas, varianzas, percentiles e intervalos, por un lado, y los histogramas y diagramas de cajas y bigotes, por otro.

Este análisis se puede realizar por medio de programas informáticos. En este caso, se selecciona el software R, por ser de uso libre y proporcionar un entorno completo para el análisis de datos y obtención de gráficos (R Development Core Team, 2011). Además, utilizado en combinación con la librería INLA (R-INLA *package*), permite llevar a cabo, posteriormente, la modelización estadística, tal y como se indica en el apartado 4.2.5 de este capítulo.

4.7.2 III.2 CONFIGURACIÓN DE LOS MODELOS

A la expresión definida en el apartado 4.2.5

$$\eta_{it}(s_i) = \beta_0 + \sum_i \beta_i X_i$$

se le añaden las cinco covariables seleccionadas, MU, H/W, O, S/V y A, con sus correspondientes coeficientes β_i , que cuantifican el efecto de las covariables sobre las variables respuesta.

Con ello, se conforma la batería de modelos, de manera que se agotan todas las combinaciones posibles de covariables para analizar su efecto sobre las variables respuesta. Se desea comparar el efecto de la covariable manzana urbana (MU) en las diferentes variables respuesta, por lo que se conforma en primer lugar, dos baterías de modelos: la primera, considera únicamente cuatro covariables (H/W, O, S/V y A) por separado (ver Tabla 4.5), mientras que la segunda considera esas cuatro covariables de forma conjunta (Tabla 4.6). Por otro lado, si se considera la covariable MU como una covariable más dentro del modelo, se obtienen otras dos baterías de modelos: una tercera considerando las cinco covariables de forma independiente (H/W, A, O, S/V y MU) (Tabla 4.7), y una cuarta considerando las cinco covariables pero de forma conjunta (Tabla 4.8).

De forma genérica, se presenta en la Tabla 4.5, Tabla 4.6, Tabla 4.7 y Tabla 4.8 las baterías de modelos que pueden obtenerse, donde cada una de las celdas representa un modelo de predicción distinto.

Tabla 4.5 Primera batería de modelos considerando las covariables H/W, A, O y S/V por separado, comparando las MU

		H/W	A	O	S/V
MU1	DE _r				
	DE _c				
	HD _v				
	HD _i				
MU2	DE _r				
	DE _c				
	HD _v				
	HD _i				
MU _n	DE _r				
	DE _c				
	HD _v				
	HD _i				

Tabla 4.6 Segunda batería de modelos considerando las covariables H/W, A, O y S/V de forma conjunta, comparando las MU

		H/W	A	O	S/V
MU1	DE _r				
	DE _c				
	HD _v				
	HD _i				
MU2	DE _r				
	DE _c				
	HD _v				
	HD _i				
MU _n	DE _r				
	DE _c				
	HD _v				
	HD _i				

Tabla 4.7 Tercera batería de modelos considerando todas las covariables (H/W, A, O, S/V y MU) por separado

	H/W	A	O	S/V	MU
DE _r					
DE _c					
HD _v					
HD _i					

Tabla 4.8 Cuarta batería de modelos considerando todas las covariables (H/W, A, O, S/V y MU) de forma conjunta

	H/W	A	O	S/V	MU
DE _r					
DE _c					
HD _v					
HD _i					

4.7.3 III.3 SELECCIÓN DE MODELOS CON MEJOR AJUSTE

Una vez obtenidas las baterías de modelos, la comparación entre todos ellos puede llevarse a cabo mediante el parámetro *Deviance Information Criterion* (DIC) (Spiegelhalter et al., 2002), que establece un criterio de comparación de modelos Bayesianos, definido por la expresión

$$DIC = \text{"bondad de ajuste"} + \text{"complejidad"} = D(\bar{\theta}) + 2p_D$$

donde $D(\bar{\theta})$ es la desviación del valor final de cada parámetro y p_D denota el número efectivo de parámetros que miden la complejidad del modelo. El modelo es mejor cuando DIC toma valores más bajos.

Por otro lado, el *Conditional Predictive Ordinate* (CPO) (Pettit et al., 1990) también se tiene en cuenta para realizar la comparativa entre modelos, el cual expresa la probabilidad posterior de observar el valor (o el conjunto de valores) de y_i cuando el modelo está ajustado a todos los datos excepto a y_i

$$CPO_i = \pi(y_i^{obs} | y_{-i})$$

En esta expresión, y_{-i} denota las observaciones con el componente i -ésimo eliminado. Esto facilita la computación del *cross-validated log-score* (Gneiting and Raftery, 2007) para la selección del modelo ($-(\text{mean}(\log(cpo)))$). Por lo tanto, el menor valor de DIC y de CPO sugiere el modelo con el menor error asociado. Un número mayor de parámetros significa mayor complejidad. Los mejores modelos son aquellos con el nivel más alto de complejidad y con una bondad alta de ajuste. Por tanto, el modelo que muestre el menor CPO y DIC será escogido como el más ajustado.

Obtenidos los modelos, el próximo paso es la comparación entre los valores observados y los valores predichos, que puede ser llevada a cabo mediante los coeficientes de correlación y el *root mean square error* (RMSE). Los modelos mejor ajustados serán aquellos que presenten un coeficiente de correlación alto y un bajo RMSE.

Así pues, para poder comparar los modelos, para cada modelo de las baterías planteadas se deberá calcular:

- CPO
- DIC
- coeficiente de correlación entre los valores observados y los predichos
- RMSE.

Estos parámetros serán comparados de acuerdo a lo expuesto anteriormente para identificar los modelos con mejor ajuste. Con todo lo anteriormente expuesto, se obtienen las ecuaciones de predicción de las variables respuesta:

$$DE_r = \beta_0 + \beta_1 \cdot A + \beta_2 \cdot S/V + \beta_3 \cdot O + \beta_3 \cdot H/W + \beta_4 \cdot MU$$

$$DE_c = \beta_0 + \beta_1 \cdot A + \beta_2 \cdot S/V + \beta_3 \cdot O + \beta_3 \cdot H/W + \beta_4 \cdot MU$$

$$HD_v = \beta_0 + \beta_1 \cdot A + \beta_2 \cdot S/V + \beta_3 \cdot O + \beta_3 \cdot H/W + \beta_4 \cdot MU$$

$$HD_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot A + \beta_2 \cdot S/V + \beta_3 \cdot O + \beta_3 \cdot H/W + \beta_4 \cdot MU$$

4.7.4 III.4 IDENTIFICACIÓN DE COVARIABLES SIGNIFICATIVAS

Con el objeto de identificar qué covariables tienen un efecto más significativo sobre las variables respuesta, se analizan los efectos fijos de todos los modelos (denotados por β_i), de los cuales se espera que tengan una influencia sistemática y predecible sobre los datos. La computación de los errores estándar de los efectos fijos implica la inversión de una matriz y otros cálculos complejos para obtener las diagonales de la inversa de la matriz. Cuando la matriz es grande, dicha estimación de los errores requiere operaciones computacionales muy complejas, por lo que muchos procedimientos no proporcionan una estimación del error para los efectos fijos. En el contexto de este trabajo, el enfoque Bayesiano basado en la aproximación de Laplace (INLA) proporciona un adecuado y rápido procedimiento para calcular los errores, para cada modelo planteado.

Los efectos fijos se expresan según β_i (media y percentiles (del percentil 2,5% hasta el 97,5%)) y se presentarán, para cada uno de los modelos, en las tablas anteriores (Tabla 4.5 - Tabla 4.8).

Para la identificación de las variables significativas, cabe indicar que estas tienen la media y los percentiles sin cambio de signo. El signo positivo implica que las variables respuesta aumenten cuando lo hace la covariable, mientras que el signo negativo implica que las variables respuesta disminuyen cuando también lo hace la covariable.

4.8 ETAPA IV: EXTRAPOLACIÓN DEL DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO A ESCALA URBANA

Obtenidas las cuatro ecuaciones de predicción de las variables respuesta, esta cuarta etapa de la metodología tiene como finalidad estimar el comportamiento energético del parque edificatorio que conforma el área de estudio. Para ello, los resultados obtenidos para cada edificio representativo deben ser extrapolados desde la escala individual de edificio a la escala urbana. La tecnología SIG resulta una herramienta fundamental en esta fase al permitir tratar un volumen extenso y complejo de información urbana. La determinación de los valores de los indicadores de evaluación energética en cada uno de los edificios del área de estudio, a nivel individual, permite su agregación para conocer el comportamiento energético del barrio completo, siguiendo el enfoque *bottom-up*. La representación de los resultados en esta Etapa IV se presenta en mapas urbanos energéticos, que constituyen una herramienta visual para mostrar las cuatro variables respuesta del modelo: DE_r , DE_c , HD_v y HD_i .

La Figura 4.11 presenta el esquema conceptual de dicha agregación, desde la escala individual de edificio a la escala urbana.

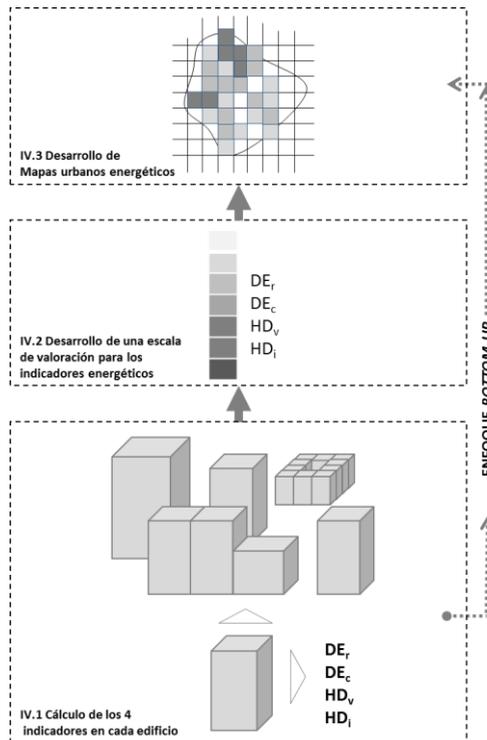


Figura 4.11 Procedimiento de agregación

4.8.1 IV.1 CÁLCULO DE LOS INDICADORES ENERGÉTICOS EN CADA EDIFICIO

Tras la fase experimental de evaluación energética y tratamiento estadístico de sus resultados, se retoma la realidad urbana. Las cuatro ecuaciones de predicción deben ser aplicadas a cada uno de los edificios que forman parte del área urbana, teniendo en cuenta las covariables que afectan individualmente a cada edificio, lo que permite estimar su demanda energética de calefacción y de refrigeración y las horas anuales de discomfort para invierno y para verano. Con ello, el efecto de las covariables asociadas a cada edificio queda integrado para determinar el comportamiento energético.

Desde un enfoque *bottom-up*, al representar los resultados de la evaluación de cada edificio en la herramienta SIG, se obtiene el diagnóstico energético del parque edificado que conforma el área de estudio de manera global.

Cada una de las referencias catastrales de la tabla de atributos utilizada en la herramienta SIG, lleva asociados los cuatro valores de las correspondientes variables respuesta (DE_r , DE_c , HD_v y HD_i), según se muestra en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9 Formato de la tabla de atributos de SIG

Referencia catastral	Sup.construida	...	Indicadores energéticos					
			DE_r	DE_r total	DE_c	DE_c total	HD_v	HD_i
...	m ²	...	kWh/m ² año	kWh/año	kWh/m ² año	kWh/año	horas/año	horas/año

Al contener la tabla de atributos la superficie construida de cada edificio, multiplicando dicha superficie por la demanda energética del edificio (en kWh/m²año), se puede estimar la demanda energética total del área urbana estudiada. Las horas de discomfort se obtienen de manera directa aplicando la ecuación (en horas/año).

4.8.2 IV.2 DESARROLLO DE UNA ESCALA DE VALORACIÓN PARA LOS INDICADORES ENERGÉTICOS

Para representar los resultados del diagnóstico energético se elabora una escala de valoración que clasifica los valores de los cuatro indicadores. La delimitación de los rangos en dicha escala se realiza de dos formas:

- Indicadores de demanda energética (DE_r , DE_c). Se utiliza la clasificación energética de indicadores para edificios existentes de España, según el procedimiento establecido en el Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios (Ministerio de la Presidencia, 2013), como se indica en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10 Escala de valoración para los indicadores DE_r y DE_c

Indicador energética	ED_c [kWh/m ² año]	ED_h [kWh/m ² año]
A	$ED_c < 4,7$	$ED_h < 4,7$
B	$4,7 \leq ED_c < 7,6$	$4,7 \leq ED_h < 10,9$
C	$7,6 \leq ED_c < 11,7$	$10,9 \leq ED_h < 19,6$
D	$11,7 \leq ED_c < 18$	$19,6 \leq ED_h < 32,8$
E	$18 \leq ED_c < 22,3$	$32,8 \leq ED_h < 64,5$
F	$22,3 \leq ED_c < 27,4$	$64,5 \leq ED_h < 70,3$
G	$ED_c \geq 27,4$	$ED_h \geq 70,3$

- Indicadores de horas de desconfort (HD_v , HD_i). Al no existir una clasificación oficial para estos indicadores energéticos, se propone una escala de valoración en el marco de este trabajo, que comprende rangos de amplitud 1.000 h/año, como se observa en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11 Escala de valoración para los indicadores DE_r y DE_c

Indicador HD	HD [h/año]
A	$HD < 1.000$
B	$1.000 \leq HD < 2.000$
C	$2.000 \leq HD < 3.000$
D	$3.000 \leq HD < 4.000$
E	$4.000 \leq HD < 5.000$
F	$5.000 \leq HD$

4.8.3 IV.3 DESARROLLO DE MAPAS URBANOS ENERGÉTICOS

Llegados a este punto, es posible representar gráficamente los resultados en la cartografía urbana. Así, de una forma intuitiva y visual, se pueden identificar fácilmente los edificios que demandan una mayor cantidad de energía y los que generan a sus ocupantes unas condiciones más desfavorables de confort térmico.

Los resultados se agruparán en diferentes rangos de valores, según las escalas de valoración propuestas en la Tabla 4.10 y la Tabla 4.11, de manera que los cuatro indicadores, DE_r , DE_c , HD_v y HD_i , quedarán cuantificados como resultado de implementar la metodología a un área urbana objeto de estudio.

4.9 CONCLUSIÓN

El presente capítulo ha expuesto la metodología propuesta para la evaluación energética pasiva de un determinado parque edificatorio consolidado de edificios residenciales existentes, desde un enfoque *bottom-up*. Las diferentes etapas que la constituyen exponen, de forma genérica, el procedimiento que debe ser seguido para implementar la metodología en cualquier área urbana, bien a escala de barrio o de ciudad, y en España o en cualquier otro contexto.

Mediante la consideración de cinco covariables, a nivel urbano y de edificio, es posible determinar la demanda de energía y las horas de desconfort para cada uno de los edificios que compone un área urbana, teniendo en cuenta no sólo el edificio como elemento individual y aislado, sino también el entorno urbano en el que este se ubica. El estudio en detalle de unos determinados edificios representativos de la totalidad del parque edificado y la asunción del enfoque *bottom-up*, hacen que la metodología permita extrapolar las conclusiones desde una escala de edificio a una escala de barrio o ciudad, simplificando el proceso que supondría analizar individualmente todos los edificios que componen el área de estudio.

Como mayor novedad, cabe destacar el proceso utilizado para la extrapolación del diagnóstico energético a escala urbana, el cual se desarrolla a través de un modelo de predicción que permite integrar los condicionantes urbanos y del edificio en las cuatro ecuaciones que constituyen los indicadores energéticos de evaluación. Ello evita el reduccionismo de asumir valores de demanda energética y de desconfort térmico para todos los edificios de una misma tipología, como se asume en muchos de los trabajos anteriormente realizados. De esta manera, los cuatro indicadores pueden ser determinados para cada edificio que integra el área de estudio, individualmente, según los valores que adoptan sus covariables asociadas.

La integración de la tecnología SIG permite crear una base de datos georreferenciada que contiene información urbana en diferentes niveles, lo que facilita el proceso de caracterización y, además, permite representar los resultados finales en mapas urbanos energéticos. La visualización de los resultados en mapas proporciona una interfaz intuitiva que pone a disposición de los diferentes agentes intervinientes en los procesos urbanísticos, una herramienta útil para la toma de decisiones, de forma objetiva y transparente.

Como se observa, la metodología propuesta se define de forma genérica por lo que puede adaptarse al contexto específico de la región donde vaya a ser implementada. Asimismo, ésta podría ser actualizada añadiendo nuevas variables respuesta para evaluar el edificio energéticamente, o bien, nuevas covariables, con el objetivo de investigar otros aspectos y su relación con el comportamiento energético del parque edificado.

4.10 REFERENCIAS

- Aksoezen, M., Daniel, M., Hassler, U., Kohler, N., 2015. Building age as an indicator for energy consumption. *Energy Build.* 87, 74-86. doi:10.1016/j.enbuild.2014.10.074
- Ascione, F., De Masi, R.F., de Rossi, F., Fistola, R., Sasso, M., Vanoli, G.P., 2013. Analysis and diagnosis of the energy performance of buildings and districts: Methodology, validation and development of Urban Energy Maps. *Cities* 35, 270-283. doi:10.1016/j.cities.2013.04.012
- Asociación gvSIG, 2014. gvSIG Desktop.
- ATECYR, Universidad Politécnica de Valencia, 2011. CERMA Programa informático simplificado según el método abreviado para la calificación de eficiencia energética de edificios residenciales.
- Blangiardo, M., Camaletti, M., 2015. *Spatial and Spatio-temporal Bayesian Models with R-INLA*. John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex.
- Blangiardo, M., Camaletti, M., Baio, G., Rue, H., 2013. Spatial and Spatio-temporal Epidemiology Spatial and spatio-temporal models with R-INLA. *Spat. Spatiotemporal. Epidemiol.* 4, 33-49. doi:10.1016/j.sste.2012.12.001

- Boardman, B., 2007. Examining the carbon agenda via the 40% House scenario. *Build. Res. Inf.* 35, 363-378. doi:10.1080/09613210701238276
- Cameletti, M., Lindgren, F., Simpson, D., Rue, H., 2013. Spatio-temporal modeling of particulate matter concentration through the SPDE approach 109-131. doi:10.1007/s10182-012-0196-3
- Caputo, P., Costa, G., Ferrari, S., 2013. A supporting method for defining energy strategies in the building sector at urban scale. *Spec. Sect. Long Run Transitions to Sustain. Econ. Struct. Eur. Union Beyond* 55, 261-270. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.12.006
- Cheng, V., Steemers, K., 2011. Modelling domestic energy consumption at district scale: A tool to support national and local energy policies. *Environ. Model. Softw.* 26, 1186-1198. doi:10.1016/j.envsoft.2011.04.005
- Dall'O', G., Galante, A., Torri, M., 2012. A methodology for the energy performance classification of residential building stock on an urban scale. *Energy Build.* 48, 211-219. doi:10.1016/j.enbuild.2012.01.034
- Dascalaki, E.G., Droutsa, K.G., Balaras, C.A., Kontoyiannidis, S., 2011. Building typologies as a tool for assessing the energy performance of residential buildings – A case study for the Hellenic building stock. *Energy Build.* 43, 3400-3409. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.002
- DesignBuilder UK, 2015. DesignBuilder software.
- DGC, 2014. Dirección General del Catastro.
- Farahbakhsh, H., Ugursal, V.I., Fung, A.S., 1998. A residential end-use energy consumption model for Canada. *Int. J. Energy Res.* 22, 1133-1143. doi:10.1002/(SICI)1099-114X(19981025)22:13<1133::AID-ER434>3.0.CO;2-E
- Firth, S.K., Lomas, K.J., Wright, a. J., 2010. Targeting household energy-efficiency measures using sensitivity analysis. *Build. Res. Inf.* 38, 25-41. doi:10.1080/09613210903236706
- Florio, P., Teissier, O., 2015. Estimation of the Energy Performance Certificate of a housing stock characterised via qualitative variables through a typology-based approach model: A fuel poverty evaluation tool. *Energy Build.* 89, 39-48. doi:10.1016/j.enbuild.2014.12.024
- Fonseca, J.A., Schlueter, A., 2015. Integrated model for characterization of spatiotemporal building energy consumption patterns in neighborhoods and city districts. *Appl. Energy* 142, 247-265. doi:10.1016/j.apenergy.2014.12.068
- Gneiting, T., Raftery, A.E., 2007. Strictly Proper Scoring Rules , Prediction , and Estimation Strictly Proper Scoring Rules , Prediction , and Estimation 102, 359-378. doi:10.1198/016214506000001437
- Gouveia, J.P., Fortes, P., Seixas, J., 2012. Projections of energy services demand for residential buildings: Insights from a bottom-up methodology. *Energy* 47, 430-442. doi:10.1016/j.energy.2012.09.042
- Hens, H., Verbeeck, G., Verdonck, B., 2001. Impact of energy efficiency measures on the CO2 emissions in the residential sector, a large scale analysis. *Energy Build.* 33, 275-281.
- Huang, Y.J., Berkeley, L., 2000. A Bottom-Up Engineering Estimate of the Aggregate Heating and Cooling Loads of the Entire US Building Stock Prototypical Residential Buildings, en: *Proceedings of the 2000 ACEEE summer study on energy efficiency in buildings*. Pacific Grove, pp. 135-148.

- INLA, 2016. R-INLA project [WWW Document]. URL <http://www.r-inla.org/> (accedido 9.15.15).
- Instituto Valenciano de la Edificación, 2014. TABULA. Catálogo de tipología edificatoria residencial en España. Valencia.
- Johnston, D., Lowe, R., Bell, M., 2005. An exploration of the technical feasibility of achieving CO2 emission reductions in excess of 60% within the UK housing stock by the year 2050. *Energy Policy* 33, 1643-1659. doi:10.1016/j.enpol.2004.02.003
- Jones, P., Patterson, J., Lannon, S., 2007. Modelling the built environment at an urban scale—Energy and health impacts in relation to housing. *Landsc. Urban Plan.* 83, 39-49. doi:10.1016/j.landurbplan.2007.05.015
- Marshall, S., 2005. *Streets & patterns*. Taylor & Francis, New York.
- Mata, É., Kalagasidis, A.S., Johnsson, F., 2013. A modelling strategy for energy, carbon, and cost assessments of building stocks. *Energy Build.* 56, 100-108. doi:10.1016/j.enbuild.2012.09.037
- Mauro, G.M., Hamdy, M., Vanoli, G.P., Bianco, N., Hensen, J.L.M., 2015. A new methodology for investigating the cost-optimality of energy retrofitting a building category. *Energy Build.* 107, 456-478. doi:10.1016/j.enbuild.2015.08.044
- McKenna, R., Merkel, E., Fehrenbach, D., Mehne, S., Fichtner, W., 2013. Energy efficiency in the German residential sector: A bottom-up building-stock-model-based analysis in the context of energy-political targets. *Build. Environ.* 62, 77-88. doi:10.1016/j.buildenv.2013.01.002
- Ministerio de la Presidencia, 2013. Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios. España.
- Moffatt, S., 2001. *Methods for the evaluation of the environmental performance of building stock*. Editorial review by Illari Aho, Finland.
- Natarajan, S., Levermore, G.J., 2007. Predicting future UK housing stock and carbon emissions. *Energy Policy* 35, 5719-5727. doi:10.1016/j.enpol.2007.05.034
- Olaya, V., 2012. *Sistemas de Información Geográfica*.
- Penna, P., Prada, A., Cappelletti, F., Gasparella, A., 2015. Multi-objectives optimization of Energy Saving Measures in existing buildings. 49th AICARR Int. Conf. - Hist. Exist. Build. Des. retrofit 95, 57-69. doi:10.1016/j.enbuild.2014.11.003
- Pettit, A.L.I., Journal, S., Statistical, R., Series, S., 1990. The conditional predictive ordinate for the normal distribution 52, 175-184.
- R Development Core Team, 2011. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*.
- Ren, Z., Paevere, P., McNamara, C., 2012. A local-community-level, physically-based model of end-use energy consumption by Australian housing stock. *Energy Policy* 49, 586-596.
- Rue, H., Martino, S., 2009a. Approximate Bayesian inference for latent Gaussian models by using integrated nested Laplace approximations. *J. R. Stat. Soc.* 319-392.
- Rue, H., Martino, S., 2009b. Approximate Bayesian inference for latent Gaussian models by using integrated nested Laplace approximations 319-392.
- Rue, H., Martino, S., 2007. Approximate Bayesian inference for hierarchical Gaussian Markov random field models. *J. Stat. Plan. Inference* 137, 3177-3192. doi:10.1016/j.jspi.2006.07.016

- Shorrocks, L., Dunster, J., 1997. The physically-based model BREHOMES and its use in deriving scenarios for the energy use and carbon dioxide emissions of the UK housing stock. *Energy Policy* 25, 1027-1037. doi:10.1016/S0301-4215(97)00130-4
- Snäkin, J.-P.A., 2000. An engineering model for heating energy and emission assessment The case of North Karelia, Finland. *Appl. Energy* 67, 353-381.
- Spiegelhalter, D.J., Best, N.G., Carlin, B.P., 2002. Bayesian measures of model complexity and fit 583-639.
- U.S. Department of Energy, 2013. Energy Plus software.
- Vlad, I.T., Juan, P., Mateu, J., 2015. Bayesian spatio-temporal prediction of cancer dynamics. *Comput. Math. with Appl.* 70, 857-868. doi:10.1016/j.camwa.2015.06.006



5. IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN UN CASO DE APLICACIÓN

Propuesta **metodológica** para la caracterización del **comportamiento energético pasivo** del parque edificatorio **residencial** existente considerando su contexto **urbano**.

5.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo tiene como objetivo implementar la metodología expuesta en el Capítulo 4 en un caso de estudio. Para ello, se selecciona la ciudad de Castellón de la Plana, una ciudad de tamaño medio con una población de 180.690 habitantes (INE, 2015). Castellón de la Plana se ubica en la costa este Mediterránea de España, según se indica en la Figura 5.1, a una latitud de $39^{\circ}59'11''\text{N}$ y una longitud de $0^{\circ}2'12''\text{E}$, lo que le concede un clima con inviernos templados y veranos cálidos, propio de la ciudad mediterránea.



Figura 5.1 Ubicación de Castellón de la Plana

En primer lugar, se analiza el desarrollo urbanístico de la ciudad, haciendo especial hincapié en aquellos hechos históricos que han condicionado su crecimiento y que determinan el trazado urbano. En la Etapa I, se caracteriza la taxonomía urbana de la ciudad, en sus cuatro escalas (ciudad, barrio, manzana residencial y edificio). Con ello, se identifican los trazados urbanos y los barrios que la constituyen, lo que permite llegar a los niveles de manzana y edificio, para finalmente configurar la taxonomía urbana representativa. Una vez los edificios de la ciudad son caracterizados, se selecciona un barrio sobre el que se aplicarán el resto de etapas. A continuación, se identifica un conjunto de edificios representativos en el barrio, lo que permitirá abordar la Etapa II, en la que se lleva a cabo el proceso de evaluación energética. En esta, tras definir las covariables a nivel urbano y de edificio, se plantean las hipótesis de cálculo que serán objeto de simulación dinámica. En la Etapa III, se desarrolla la modelización estadística a partir de los resultados obtenidos de la evaluación energética para configurar los modelos de predicción, los cuales permiten determinar los indicadores energéticos. Por último, en la Etapa IV se extrapola el diagnóstico energético desde el

nivel de edificio a escala urbana, de manera que el comportamiento energético pasivo del parque residencial de edificios existentes en el barrio queda cuantificado. La representación de los resultados en mapas urbanos energéticos constituye el resultado de la implementación de la metodología.

5.2 DESCRIPCIÓN DEL DESARROLLO URBANÍSTICO DE CASTELLÓN DE LA PLANA

Este apartado describe la evolución urbanística de la ciudad desde su creación en el siglo XIII. Los hechos históricos acontecidos a lo largo del tiempo marcan de una forma determinante el crecimiento urbano, el cual adopta diferentes trazados que condicionarán el comportamiento energético de los edificios.

5.2.1 LA VILLA MEDIEVAL AMURALLADA DE LOS SIGLOS XIII Y XIV

Castellón de la Plana como ciudad fue concebida en el siglo XIII, como ordenación estructurada de grupos de alquerías musulmanas dispersas bajo una misma legislación del Rey *En Jaume I* y a la que le fueron otorgados los mismos privilegios de justicia que a la ciudad de Valencia.

El primer eje de población se construye paralelamente a la Acequia Mayor (con eje norte-sur) hacia el oeste, constituyéndose esta zona como centro neurálgico comercial durante siglos. El crecimiento posterior del núcleo se produce hacia el oeste, alejándose del mar para dejar precisamente estos terrenos útiles para el cultivo de las tierras más fértiles. Se trazan las calles de Enmedio (*carrer d'Enmig*) y Alloza (*carrer d'Amunt*), paralelas a la calle Mayor, y quedan cruzadas estas por la calle San Juan (hoy calle Colón). A la calle Alloza se le añaden calles secundarias para dar acceso a las viviendas, algunas de ellas sin salida, evocando la huella musulmana.

En el siglo XIV se levantan murallas, delimitando la villa con las actuales calle Gobernador al este (coincidente con la Acequia Mayor); calle San Luis y plaza Clavé al norte; la avenida del Rey al oeste, y la calle Ruiz Zorrilla, la Puerta del Sol, la calle Gasset, calle Escultor Viciano al sur. En la Figura 5.2 puede apreciarse la evolución de la villa desde el siglo XIII al siglo XIV, hasta adquirir la morfología amurallada configurada por los mencionados límites.

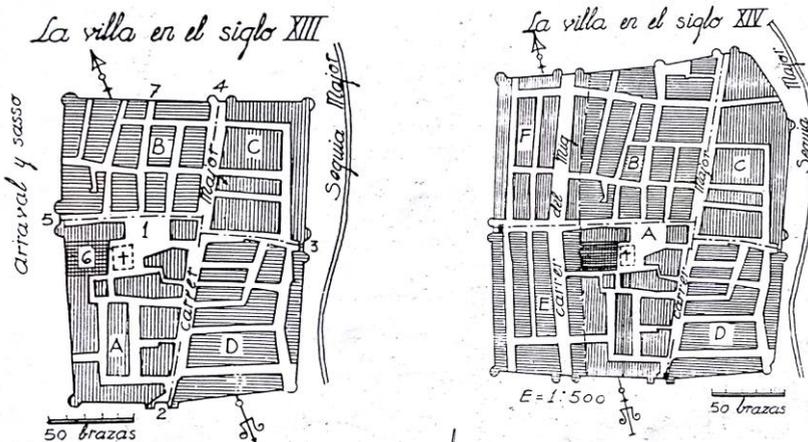


Figura 5.2 Castellón de la Plana en los siglos XIII y XIV según Vicente Traver Tomás (Sánchez Adell et al., 1993)

5.2.2 EL SURGIMIENTO DE LOS ARRABALES HASTA EL SIGLO XVIII

En esta época, el crecimiento de la ciudad queda condicionado por la construcción de cinco conventos, el de San Francisco al sur en extramuros, el de la Purísima en intramuros, el de los frailes de San Doménech al sureste, el de los capuchinos al norte y el de San Agustín en intramuros. Posteriormente se agrega el convento de las monjas Capuchinas en la actual calle de Núñez de Arce en intramuros. Los conventos y edificios religiosos eran en la época elementos de atracción para la población, sobre todo más humilde, lo que acababa influyendo en la morfología y entramado urbano, generando nuevos focos de población en sus alrededores con la consecuente aparición de nuevas calles.

El siglo XVII implica importantes cambios en el interior de las murallas por la construcción de numerosos edificios públicos. Uno de los símbolos más distinguidos de la ciudad lo constituye *el Fadri*, el campanario exento de planta octogonal levantado en 1604, junto a la catedral. En 1605 se inician las obras de *la Llotja del Cànem* (dedicada al comercio del cáñamo) en la *Plaça de l'Herba* y entre 1689 y 1716 se construye el nuevo *Palau*. Las plazas medievales existentes en la ciudad quedarán sustituidas por la *Plaça Major*, la que asumirá el rol de nuevo centro neurálgico junto al entorno de *els Quatre Cantons* y el *carrer d'Enmig*. La ciudad va rellenando los huecos internos de la estructura urbana y a su vez comienzan a aparecer casas en extramuros, que originan la formación de los arrabales. A finales del siglo XVII, los arrabales de *Sant Nicolau* y *Sant Joan* ya están constituidos, aglutinando al 10% de la población, y surgen otros dos nuevos, el de San Francisco al sur y el de San Félix al norte, siguiendo los caminos hacia el convento de San Francisco y a la ermita de San Roque, respectivamente (Figura 5.3).



Figura 5.3 Castellón de la Plana en el siglo XVI según Gimeno Michavila. Arrabal de Roser y San Francisco al sur y el de *les Forques* al norte (Ortells Chabrera, 2004)

Durante el siglo XVIII se produce un gran crecimiento en la ciudad, tanto económico como demográfico. Entre las actividades económicas destacan aquellas artesanales relacionadas con el cáñamo, condicionando incluso la fisonomía de la ciudad, siendo ejemplo la plaza de Huerto de los Sogueros y otras calles que también albergan dicha actividad. La población durante esta etapa, se ve incrementada de los 4.000 a casi los 15.000 habitantes.

La antigua muralla medieval y los fosos que la rodeaban se encontraban muy deteriorados con el paso de los años y fue a finales del siglo XVIII y principios del XIX cuando se lleva a cabo el derribo y saneamiento por orden del Gobernador Bermúdez de Castro, quien da actualmente nombre a la calle por donde discurría la acequia mayor. El nuevo terreno disponible que queda al derribar las murallas se cede por medio de adjudicaciones para la construcción de viviendas, con la condición de que los beneficiarios se encargaran del derribo, cubrición del foso y construcción de las viviendas en un plazo de dos años. El solar de cada una de las concesiones tenía unas dimensiones de cuatro metros de fachada, veinte de profundidad y una altura permitida de seis metros. En la actualidad, al recorrer las calles Gobernador, San Luís, plaza Clavé y la avenida del Rey, todavía se pueden encontrar multitud de edificaciones de estas características, como últimos vestigios de una etapa muy importante en el desarrollo de la ciudad Castellón de la Plana (Esteve-Comes, 2012).

Así, con el derribo de las murallas medievales en 1796, se anexionaron los arrabales en los que ya residía la mitad de la población (Ortells, 1999). Estas reformas urbanas contribuyeron a reordenar y sanear la ciudad.

5.2.3 LA CIUDAD INDUSTRIAL EN EL SIGLO XIX

En el primer tercio del siglo XIX, en 1837, con motivo de las guerras carlistas, la ciudad se vuelve a amurallar, englobando a los arrabales, proporcionándole así una morfología romboidal. Por el norte alcanzaba la ermita de San Roque y por el sur el convento de San Francisco. En el este, la Acequia Mayor continuaba siendo una barrera tras la cual no se produjo el crecimiento de la ciudad hasta más adelante. El nuevo romboide dejaba en su seno algunos huecos urbanos que más tarde albergarían nuevos barrios.

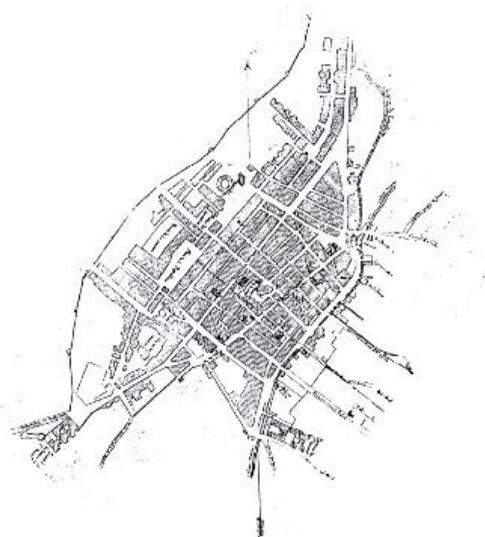


Figura 5.4 Murallas Carlistas en Castellón de la Plana en la segunda mitad del siglo XIX (Ortells Chabrera, 2004)

La red de comunicaciones supone en estas fechas nuevos canales de evolución urbana. El camino Real de Valencia a Barcelona discurría de sur a norte por el oeste y constituía la arteria principal de la ciudad. Se mejora también el camino viejo de Alcora y Maestrazgo, se traslada el cementerio, se abre la carretera a Morella y Zaragoza y en 1862 el ferrocarril a Valencia ve la luz, situándose la estación a las afueras. La vía férrea constituirá durante muchos años el límite de crecimiento de la ciudad por el oeste. Se inaugura también la nueva carretera del Mar (hoy, avenida Hermanos Bou) que une el centro de la ciudad con el Grao, donde se ubica el puerto marítimo.

En el año 1885, el arquitecto Godofredo Ros de Ursinos redacta el primer plan de urbanización de la periferia de la ciudad. Cinco años después, en 1890, un nuevo plan articula el crecimiento en el sureste (calles Asensi, Herrero y Casalduch). También se inaugura en 1888 la línea de Castellón al Grao de La Panderola, un ferrocarril a vapor de vía estrecha que tenía por objeto cubrir las necesidades de comunicación y que acabó convirtiéndose en una de las infraestructuras más importantes de la provincia durante sus 75 años de funcionamiento. Los nuevos ejes constituyeron las guías de la futura expansión urbana moderna.

La evolución demográfica del municipio durante el siglo XIX experimenta un gran crecimiento, pasando de los casi 17.000 habitantes en 1847 a los 31.300 en 1897 (Ortells, 1999).

A finales del siglo XIX se derriban finalmente las murallas, hecho que origina nuevos cambios en la estructura urbana. También se van ejecutando diversas infraestructuras que dotan a la ciudad de asfaltado, red de teléfono, alumbrado eléctrico, hospital, instituto, entidades bancarias, cines y teatros.

5.2.4 EL CRECIMIENTO A PRINCIPIOS DEL SIGLO XX

Durante los inicios del siglo XX, la ciudad muestra un notable esplendor, luciendo un aspecto moderno. En esta época Castellón de la Plana contaba con diez barrios: Santa María, San Juan, San Nicolás, San Pedro, San Agustín, Santo Tomás, San Félix, San Roque, la Trinidad y el Grao. Se abren plazas como la Constitución (la actual Plaza Mayor), donde se celebra el mercado diario; la plaza del Rey Don Jaime que acoge el mercado semanal los lunes, la Plaza María Agustina y la Plaza Clavé, entre otras.

En 1911 Josep Gimeno Almela redacta el primer plan de ensanche, englobando a los dos anteriores, el cual fue aprobado mediante Real Decreto el 18 de septiembre de 1914. El plan subdividía a la zona sureste de la ciudad en dos zonas: la comprendida entre la carretera de Valencia y la avenida Casalduch, y la que consistía en una prolongación de la ciudad hasta el Parque del Oeste. A su vez, también dividía a la zona suroeste de la ciudad en dos zonas, el actual barrio Cremor y la zona comprendida entre la carretera de Valencia y la antigua vía del ferrocarril. La zona sureste se caracteriza por un entramado urbano con manzanas de dimensiones 60 x 60 m, mientras que la suroeste por manzanas mayores de 100 x 200 m (Olucha Montins, 1996).

En 1925, el arquitecto Vicente Traver Tomás redacta el primer Plan General de Ordenación y Urbanización de Castellón de la Plana, en el que propone una división de la ciudad en tres zonas: la zona interior o casco (delimitada por las antiguas murallas carlistas del siglo XIX), zona de ensanche (correspondiente a los anteriores planes de ensanche), y zona de expansión o ciudad jardín¹

¹ Movimiento urbanístico fundado en 1902 por Ebenezer Howard como respuesta a la necesidad de dotación de viviendas obreras. El modelo propone un centro urbano, rodeado por un cinturón vegetal, diseñado para el desarrollo de una vida saludable y actividad de trabajo, con un tamaño medio que posibilite la vida social y la plenitud de sus habitantes. El concepto establece un crecimiento moderado y la titularidad pública de los terrenos, con el fin de evitar la especulación (Howard, 1899).

(correspondiente a las nuevas áreas de crecimiento). Sin embargo, el plan no fructificará debido a la llegada de la guerra civil.

5.2.5 LA CIUDAD DE LA POSTGUERRA

Tras la Guerra Civil, la ciudad experimenta sustanciosos y rápidos cambios demográficos que dan lugar a una gran expansión, no demasiado estructurada. En 1939 se aprobó un nuevo plan redactado también por el arquitecto Vicente Traver Tomás. Aunque el crecimiento de la ciudad tampoco siguió las directrices de este plan, muchas de las reformas interiores planteadas por Traver fueron ejecutadas años después de la guerra. La mayoría de estas iban encaminadas a la supresión de manzanas del tejido histórico, apareciendo en su lugar nuevas plazas, avenidas o calles rectilíneas.

Algunas de las reformas más importantes son la mejora de la plaza de Huerto de los Sogueros y la configuración de la Avenida del Rey (en 1956), aunque truncada en su extremo norte dejando desprovista a la ciudad de un gran eje de norte a sur. También la Plaza Mayor se ve remodelada en 1947. En la zona de ampliación se incluyen las vías inmediatamente contiguas al casco, siendo estas las Rondas, la calle Gobernador, calle Asensi, calle Trinidad, calle Herrero, calle San Roque y Sanahuja entre otras. La ciudad jardín se proponía como extensión de las anteriores para albergar los *masets* tradicionales dentro de la estructura urbana. La idea de ciudad jardín tampoco prospera, aunque recientemente han surgido barrios residenciales que evocan dicho concepto, como son el Pau Lledó y Pau Censal, integrados por viviendas unifamiliares que constituyen barrios de baja densidad.

A partir de los años sesenta y hasta la actualidad, la ciudad atraviesa una etapa clave que trascenderá en la configuración urbana. El aumento poblacional debido en gran parte a la inmigración (interior de España y Andalucía), hace alcanzar cifras que pasan de los 62.500 habitantes en 1960, a los 93.000 en 1971 hasta los 134.000 en 1989. Así, la población se duplica en tan sólo 30 años, lo que hace duplicar también el tejido urbano. Entre 1961 y 1980 se construyen 7.509 viviendas, de las cuales el 25% son edificios en altura de más de 5 plantas (en 1950 estos no alcanzaban el 1%). En 1980, casi el 50% de las viviendas contaba con menos de 25 años (Ortells, 1999).

Entre los años 50 y 60, algunos edificios de importancia y trazados viarios marcarán la aparición de nuevos barrios obreros, como es el caso del estadio de fútbol Castalia, la carretera nacional N-340 o la nueva Avenida del Mar, que junto con la existente vía férrea, iban configurando los nuevos límites urbanos. Al sur el Parque del Oeste (el barrio más geométrico de la ciudad con 20 manzanas de dimensiones similares), al norte *els Mestrets*, los barrios de Rafalafena y de Fadrell al este, los de la avenida Capuchinos y avenida de *Lledó* también al Norte. Cabe destacar que se introdujo, en barrios como el de Rafalafena, el nuevo concepto de *open plan*², donde predominan los condominios cerrados de orden abierto formados por grandes bloques de edificios aislados rodeados de zonas verdes, propios también de la ciudad jardín, concepto promovido por el Plan Traver del 1925.

Algunos ejemplos de ciudad jardín se pueden ver actualmente en Inglaterra, como Letchworth, Welwyn y en EE. UU., Radburn. En España, el concepto fue materializado, en algunos casos, a través de la Ley de casas baratas de 1921.

² Concepto surgido durante la década de 1950, que llegó a Europa a finales de 1970, concebido inicialmente para ser aplicado en la arquitectura y el urbanismo. En el ámbito del urbanismo, el concepto consiste en la creación de grandes espacios libres mediante una adecuada disposición de las edificaciones. Las edificaciones son de manzana abierta y no ocupan la totalidad de la superficie de parcela, de manera que estos espacios libres no están separados de la vía pública mediante ningún elemento físico, quedando como zonas verdes o destinadas a otros equipamientos, como deportivo, ocio o aparcamiento (Ward, 1999).

En abril de 1945 tiene lugar un hecho importante en el trazado de la ciudad, pues comienzan las obras de la nueva avenida del Mar (las cuales se prologarán hasta el año 1963), que abrirán una vía principal desde la plaza Cardona Vives hasta el mar, desembocando así en el Grao.

El año 1958 se aprueban la Ordenanzas de Construcción y Saneamiento, que supusieron una ruptura con los planes anteriores y sirvieron como predecesoras de los actuales planes urbanísticos (Olucha Montins, 1996).

En 1963 se desarrolla y aprueba el Plan General de Ordenación Urbana (PGOU) de Castellón redactado por Romaní y Miquel, Prades Safont y Traver G. Espressati, según las bases de la Ley del Suelo de 1956. Esta enfoca con un carácter globalizador toda la problemática de la ciudad. No obstante, hasta la fecha, la rápida expansión de la ciudad no sigue un crecimiento ordenado según unas pautas planificadas, pues el Plan de 1963 no tuvo efectividad ante la carencia de los planes parciales que debían desarrollarlo. Así, ante la rápida y creciente demanda de construcción de vivienda, en la respuesta se pierde el concepto de crecimiento compacto. Además, en el PGOU no se preveía la incorporación de zonas verdes ajardinadas, cuando una de las actividades tradicionales principales de la ciudad era la huerta y el cultivo.

El crecimiento se expande hacia el oeste, superando la barrera de las vías férreas. Hacia el este, se desarrolla el Polígono Rafalafena, con un crecimiento más ortodoxo promovido por el Instituto Nacional de la Vivienda. La evolución de la ciudad, pues, sigue una tendencia marcadamente circular (o tentacular, alrededor de las vías de acceso a la ciudad) del entramado urbano, como se observa en la Figura 5.5. Esta estructura además, se ve complementada con la aparición de numerosos grupos periféricos, constituidos por viviendas dispersas generalmente de una sola planta y rodeadas por terreno agrícola, y generalmente caracterizados por la falta de equipamiento.

Otra consecuencia del crecimiento es el aumento desproporcionado de las alturas de los edificios en el casco urbano, que conlleva una densificación del mismo. Comienzan a erigirse edificios de alturas dispares, conviviendo los edificios habituales de 3 o 4 plantas, con los de alturas incluso superiores a 8 plantas, alcanzando las 12 y 14 plantas.

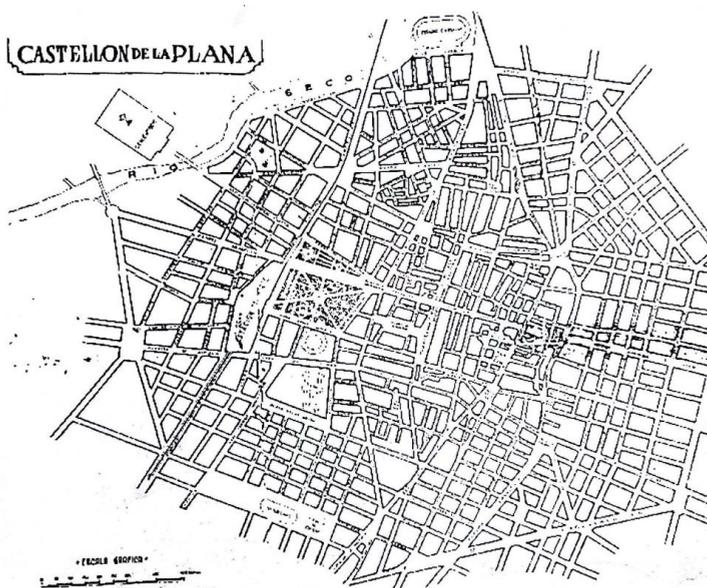


Figura 5.5 Forma circular de Castellón de la Plana en la década de los 50 (adaptado de Ortells Chabrera (2004))

5.2.6 LA CIUDAD ACTUAL. FINALES DEL SIGLO XX E INICIOS DEL XXI

El tejido urbano en los años 80 y 90 experimenta transformaciones importantes, dada la aparición de nuevos PGOU que ordenan el territorio de una forma más estructurada. Durante estos años, las reformas internas se completan con la remodelación de plazas, parques y jardines. En 1984 entra en vigor un nuevo PGOU que intentará reconducir el crecimiento desordenado sufrido años atrás. Posteriormente, el PGOU de 2000 introduce grandes actuaciones urbanísticas de uso residencial, dejando a la ciudad rodeada de nuevas zonas como son el PERI 19 y PAU Lledó en el norte, el PAU Gumbau en el este, el PERI 18 y PAU Censal en el sur, y la zona de la *Universitat Jaume I* al oeste.

En el año 2000 la nueva estación de ferrocarril abre sus puertas, rompiendo la barrera que suponía la antigua vía del tren y que impedía el crecimiento de la ciudad hacia el oeste. En el espacio ocupado por las antiguas vías del tren se emplaza un bulevar que recorre su trazado de sur a norte. Queda así como nueva barrera en la zona del oeste, el cauce del río Seco.

El PGOU de 2000 fue derogado y actualmente se encuentra en redacción un nuevo Plan de Ordenación. Las sucesivas normas transitorias nos llevan hasta el día de hoy, en el que se encuentran en vigor las normas urbanísticas transitorias de urgencia para el municipio de Castellón de la Plana, aprobadas por acuerdo de 27 de febrero de 2015 por la *Conselleria* de Infraestructuras, Territorio y Medio Ambiente de la *Generalitat Valenciana*. Se proponen nueve zonas para el sector de la edificación residencial y se incluyen otras clases de suelo, zonas verdes, suelo dotacional, suelo industrial y suelo terciario.

En la Figura 5.6, puede observarse la evolución de la ciudad de Castellón de la Plana, desde sus inicios en el siglo XIII hasta los inicios del XIX.

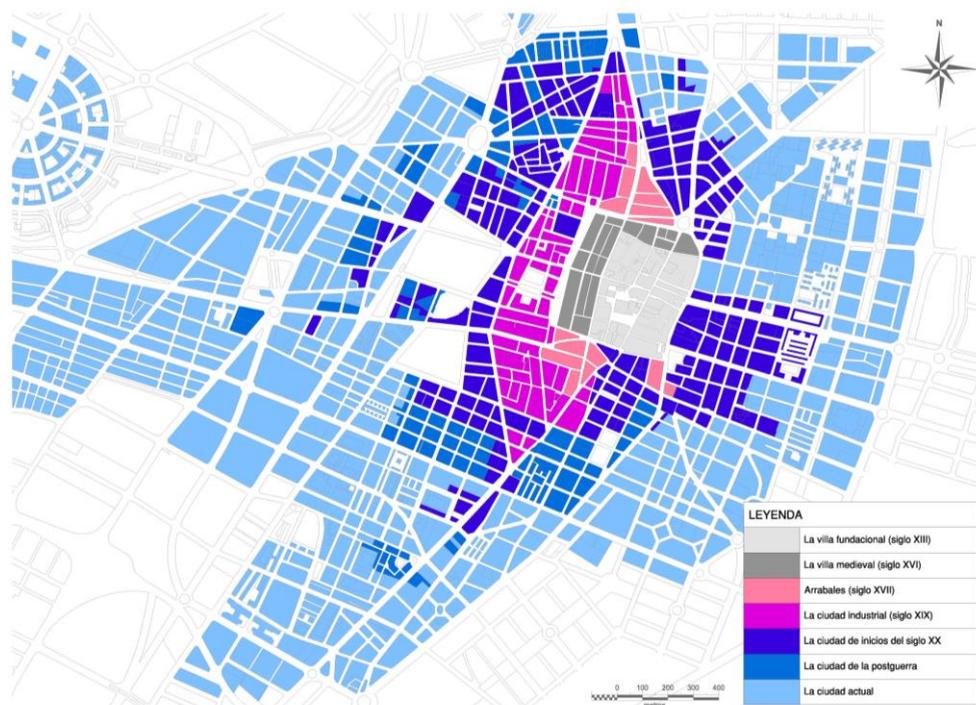


Figura 5.6 Desarrollo urbano de Castellón de la Plana (adaptado de Ortells Chabrera (2004))

La Tabla 5.1 sintetiza los PGOU que se han sucedido a lo largo del tiempo en la ciudad de Castellón de la Plana.

Tabla 5.1 Síntesis de Planes Urbanísticos de Castellón de la Plana

Año	Plan	Características
1885	Plan de Godofredo Ros de Ursinos	Periferia sureste de la ciudad (Armelar)
1890	Plan del Sureste	Sureste
1914	Plan de Ensanche (Josep Gimeno Almela)	Articulación del ensanche de la ciudad
1925	Plan de Vicente Traver Tomás	Tres zonas: casco, ensanche, ciudad jardín No se ejecuta
1939	Plan Vicente Traver Tomás	No se ejecuta, sólo algunas reformas interiores (apertura de calles y plazas)
1958	Ordenanzas de Construcción y Saneamiento	Ruptura con los planes anteriores, dan paso al siguiente.
1963	Plan General de Ordenación Urbana de Castellón (Romaní Miquel, Prades Safont, Vicente Traver Espressati)	Adaptación a la Ley del Suelo 1956. Carácter globalizador de la problemática global de la ciudad. Incumplimiento sistemático del mismo.
1984	Plan General de Ordenación Urbana de Castellón (EUSA, S.L.)	Pone freno a las consecuencias negativas del anterior plan (diferencia de alturas, falta servicios y zonas dotacionales)
2000	Plan General de Ordenación Urbana de Castellón	Nuevas zonas de expansión: PERI 19, PAU Lledó, PAU Gumbau, PERI 18, PAU Censal, y l zona de la <i>Universitat Jaume I</i> Derogado.
actualidad	PGOU en actual redacción	-

5.3 ETAPA I: CARACTERIZACIÓN DE LA TAXONOMÍA URBANA

En esta primera etapa se caracteriza la morfología de la ciudad, en sus cuatro escalas, ciudad, barrio, manzana y edificio. El uso de la herramienta gvSIG permite crear una base de datos georreferenciada, lo que representa una acción transversal a largo de esta etapa.

5.3.1 I.1 ESCALA DE CIUDAD

Tras analizar la cartografía de la ciudad y cómo está configurado el trazado de sus calles, se identifican tres patrones urbanos diferenciados, que se corresponden con el propio desarrollo urbanístico, según se observa en la Figura 5.7.

El centro histórico, los arrabales y las zonas próximas a estos hacia el oeste, se corresponden con un patrón urbano **irregular**, en el que predomina una marcada estructura anárquica que es consecuencia de la inexistencia de normas urbanísticas que marcaran el desarrollo urbano, hasta los inicios del siglo XX. En este trazado, las manzanas urbanas adoptan formas poligonales no demasiado definidas, predominan las calles estrechas con anchos variables, y las alturas de las edificaciones son marcadamente dispares. Los resquicios de viviendas unifamiliares entre medianeras, que constituyen la tipología tradicional de la ciudad, conviven con edificios plurifamiliares altos, lo que le otorga a estas zonas un paisaje anárquico y poco organizado urbanísticamente.

En las inmediaciones del centro histórico y a la derecha del arrabal norte, destaca una zona con un patrón urbano **radial**, conformado alrededor de una plaza circular (M^a Agustina), la cual vertebrada las

calles que constituyen dicha zona. También puede advertirse este patrón radial en un barrio de nueva creación al oeste de la ciudad, conformado junto a la *Universitat Jaume I*. Su forma en semicírculo tiene como centro geométrico una rotonda que da acceso a la universidad y organiza las calles del barrio con un trazado radiocéntrico.

El crecimiento urbano a partir de los inicios del siglo XX da lugar a los barrios de ensanche con configuraciones mucho más estructuradas, que generalmente adoptan un patrón urbano **ortogonal**, aunque la orientación de dicho patrón varía según las zonas de la ciudad. Las manzanas urbanas son claramente de geometría cuadrada o rectangular, salvo excepciones. Estas zonas corresponden a barrios de ensanche originados a inicios del siglo XX y durante la postguerra, en los que predominan las manzanas cerradas, y a barrios de reciente creación, conformados por edificios aislados y conjuntos de viviendas unifamiliares, que responden a una tipología edificatoria más moderna.

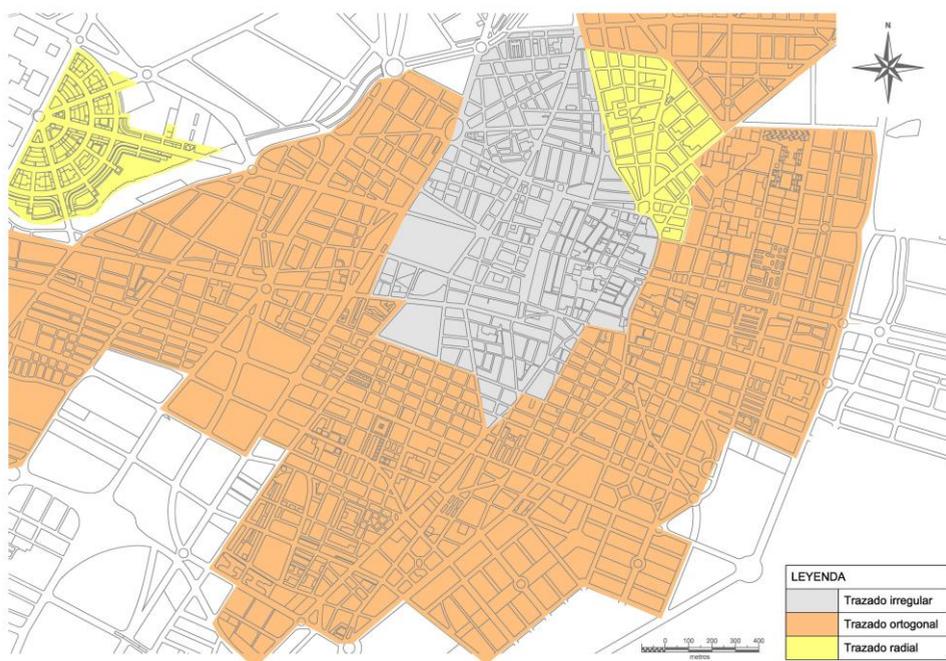


Figura 5.7 Identificación de patrones urbanos en la ciudad

5.3.2 I.2 ESCALA DE BARRIO

El desarrollo urbanístico de la ciudad, acorde a su evolución histórica, determina enormemente las ordenanzas urbanísticas que, desde su surgimiento en el año 1963, han tratado de planificar un crecimiento más ordenado. El PGOU de Castellón de la Plana diferencia doce zonas residenciales, cuyas ordenanzas urbanísticas particulares condicionan la configuración urbana y delimitan los barrios (Excmo. Ayuntamiento de Castellón de la Plana, 2008). La Tabla 5.2 expone las doce zonas, junto con la definición que aporta el propio PGOU, e indica los barrios que en ellas se integran, así como el patrón urbano que define a cada uno de los barrios.

Tabla 5.2 Delimitación de barrios en Castellón de la Plana según zonas residenciales del PGOU

Zona PGOU	Definición PGOU	Barrio integrado*	Patrón urbano*
Z-0	Corresponde a la zona de Casco Histórico	Casco Histórico	Irregular
Z-1	Corresponde a la zona de Casco Antiguo del siglo XIX y su entorno	San Roque Herreo-Trinidad Rey Don Jaime	Irregular Irregular Irregular
Z-2	Corresponde a zonas de ensanche de casco antiguo manzana cerrada de alta densidad	Cronista Rocafort Parque Ribalta Estación Carretera de Alcora Parque del Oeste Avenida de Valencia Avenida Casalduch Fadrell Avenida del Mar Capuchinos (o "Palmeretes")	Irregular Irregular Ortogonal Ortogonal Ortogonal Ortogonal Ortogonal Ortogonal Radial
Z-3	Corresponde a la regulación de la edificación en el casco urbano del Grao, una escisión de la ciudad junto a la costa	Grao	Ortogonal
Z-4	Ordenanza para la ordenación de zonas conocidas como grupos periféricos a las afueras del núcleo urbano	Virgen del Pilar Venta Rosita San José Obrero Los Cubos San Lorenzo Rossers - San Roque Tombatossals Río Seco Lourdes Perpetuo Socorro Roquetes Etc.	Diverso
Z-5	Corresponde a grupos de promoción pública y diseño unitario	Manzanas urbanas con ordenanzas particulares integradas en barrios	Integrado en el trazado del barrio
Z-6	Ordenanza de zonas de concentración de volumen edificable y cesión de zonas verdes para uso público	Manzanas urbanas con ordenanzas particulares integradas en barrios	Integrado en el trazado del barrio
Z-7	Corresponde a zonas de baja densidad, vivienda unifamiliar aislada o agrupada, dispersa, fuera del núcleo urbano	Vivienda dispersa	No definido
Z-8	Ordenanza de zonas con planeamiento de desarrollo aprobado con anterioridad al vigente Plan. Corresponde a nuevos desarrollos urbanos regulados mediante Planes Especiales de Reforma Interior (PERI), Programas de Actuación Urbanística (PAU) y Planes Parciales (PP)	Polígono Rafalafena PAU Lledó PAU Gumbau PAU Censal Pi Gros PERI 18 PERI 19 PP Universitat Jaume I (UJI)	Ortogonal Ortogonal Ortogonal Ortogonal Ortogonal Ortogonal Radial
Z-9	Corresponde a zonas de vivienda en bloque con ordenanza de volumen	Manzanas urbanas con ordenanzas particulares integradas en barrios	No definido
ENTORNO BENEFICENCIA	Ordenanza especial para la manzana delimitada por las calles Guitarrista Tárrega, Santo Domingo, en proyecto y Plaza Borrull	Integrado en el barrio Fadrell	Ortogonal
ENTORNO BASILICA LLEDO	Ordenanza especial para regular el entorno de la Basílica de Lledó	Basílica Lledó	No definido

* El texto en color gris indica las zonas fuera del ámbito del núcleo urbano de la ciudad

La Z-0 corresponde con el Casco Histórico de la ciudad y sus límites están formados por aquellos que delimitaban la antigua villa medieval amurallada del siglo XIV. El tejido urbano que surgió sin planeamiento urbanístico conlleva un desorden complejo. La existencia de pequeñas parcelas, que emplazaban viviendas unifamiliares de 4 metros de fachada y una altura de 4 plantas (PB+III), originó calles estrechas que perduran en la actualidad. Con la evolución de la ciudad, esta zona se ha mantenido como centro neurálgico comercial y de servicios, aunque los antiguos edificios conviven con edificios más recientes de uso residencial, que después de la agrupación de diversas parcelas pequeñas han dado lugar a edificaciones de mayor longitud de fachada y altitud, superando en algunos casos las 10 plantas. La estructura de la zona da lugar a un tejido irregular con gran descompensación en la altura de los edificios.

La Z-1 corresponde a las primeras expansiones del Casco Histórico en el siglo XIX hacia el oeste de la ciudad, dando lugar a tres barrios. El barrio San Roque, que engloba al arrabal norte, constituye la primera evolución de la ciudad en extramuros durante los siglos XVI y XVII, alcanzando la extensión que tiene actualmente en el siglo XIX. El barrio Herrero-Trinidad se originó con la evolución de la ciudad hacia el sur hacia las afueras de las murallas, también durante la misma franja temporal que el arrabal del norte. El barrio Rey Don Jaime surgió como expansión urbana hacia el oeste, durante el siglo XVIII, al otro lado de la avenida de su mismo nombre. Los tres barrios albergan tanto la típica vivienda unifamiliar de agricultores de la época, como edificios mucho más recientes de tipología plurifamiliar, y tienen características urbanísticas muy similares que atienden a un patrón urbano irregular.

La Z-2 corresponde a los barrios de ensanche originados ya a principios del siglo XX, durante la postguerra y las últimas décadas. Se distinguen 10 barrios que atienden a una configuración mucho más ordenada que las Z-0 y Z-1, con un trazado generalmente ortogonal. Estos son los que se indican en la Tabla 5.2.

La Z-8 corresponde a nuevos desarrollos urbanos surgidos tras la postguerra y en años más recientes, que fueron originados a través de instrumentos de ordenación urbana específicos para dichas zonas, mediante Planes Especiales de Reforma Interior (PERI), Programas de Actuación Urbanística (PAU) y Planes Parciales (PP), que dan lugar a barrios independientes.

El resto de zonas definidas por el PGOU corresponden al núcleo urbano del Grao (Z-3), a grupos periféricos alejados del núcleo urbano (Z-4) y a viviendas unifamiliares dispersas (Z-7 y el entorno de la Basílica Lledó), alejadas también del núcleo urbano, que no responden a ningún patrón urbano. La Z-5, Z-6 y Z-9 son manzanas urbanas que se rigen por unas ordenanzas específicas, pero que quedan integradas en alguno de los barrios anteriormente definidos incluidos dentro del núcleo urbano, por tanto, con su mismo patrón urbano.

La Figura 5.8 muestra la ubicación de los barrios integrados en el núcleo urbano en la cartografía de la ciudad, y los superpone al desarrollo urbano. Se aprecia claramente que la evolución histórica de la ciudad condiciona la constitución de los barrios y la configuración urbana que estos tienen, permaneciendo inamovible con el paso del tiempo.

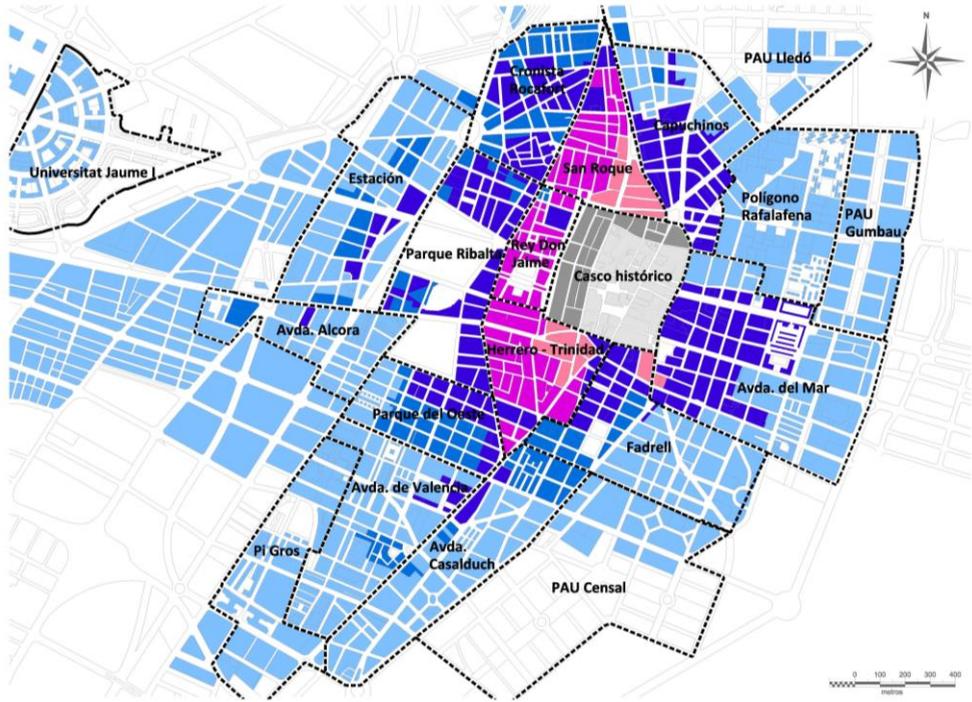


Figura 5.8 Identificación de barrios y superposición a la evolución urbana de la ciudad

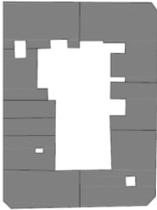
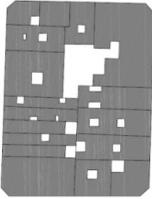
5.3.3 I.3 ESCALA DE MANZANA URBANA

Tras analizar el planeamiento urbano de la ciudad e identificar los barrios que la constituyen, se procede al estudio de las tipologías de manzana existentes, según los criterios establecidos en la metodología para la caracterización de la taxonomía urbana (Figura 4.3 del Capítulo 4):

- Geometría de la manzana
- Existencia o no de patios de manzana o de luces
- Presencia de edificios aislados o entre medianeras
- Densidad urbana baja, media o alta.

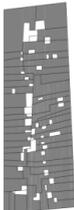
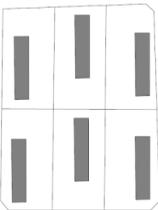
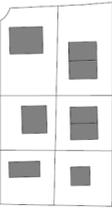
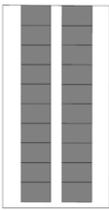
El patrón urbano es un aspecto clave que influye directamente en la morfología de la manzana. Teniendo en cuenta estos criterios, se identifican 7 tipologías de manzana urbana, cuyas características se presentan en la Tabla 5.3. En esta se exponen, además, las ventajas e inconvenientes que presenta cada tipología atendiendo a criterios de eficiencia energética.

Tabla 5.3 Tipologías y características de las manzanas urbanas identificadas en la ciudad

Tipología de MU	Situación	Edificio	Densidad	Descripción	Ventajas (Higuera, 2006)	Inconvenientes (Higuera, 2006)
MU 1	<ul style="list-style-type: none"> • Ensanche próximo al centro histórico 	PF/UF	Alta	<ul style="list-style-type: none"> • Rectangular • Edificios entre medianeras de media-alta altura con gran patio de manzana 	<ul style="list-style-type: none"> • Configuración compacta y usos mixtos • Calles anchas y proporcionadas • El gran patio de manzana implica edificios con doble orientación • Posibilidad de ganancias solares, ventilación natural en las orientaciones favorables • Áreas verdes y espacios abiertos en el entorno urbano 	<ul style="list-style-type: none"> • Mal comportamiento energético si la retícula urbana está mal orientada
MU 2	<ul style="list-style-type: none"> • Ensanche próximo al centro histórico 	PF/UF	Alta	<ul style="list-style-type: none"> • Rectangular • Edificios entre medianeras de media-alta altura con pequeños patios de luces propios de los edificios 	<ul style="list-style-type: none"> • Configuración compacta y usos mixtos • Calles anchas y proporcionadas • Posibilidad de ganancias solares, ventilación natural en las orientaciones favorables • Áreas verdes y espacios abiertos en el entorno urbano 	<ul style="list-style-type: none"> • Mal comportamiento energético si la retícula urbana está mal orientada • Los patios de luces altos y estrechos limitan las ganancias solares y la ventilación natural
MU 3	<ul style="list-style-type: none"> • Ensanche próximo al centro histórico 	PF	Alta	<ul style="list-style-type: none"> • Manzana lineal • Edificios entre medianeras de media-alta altura. Los edificios recaen a dos calles y tienen patios de luces propios 	<ul style="list-style-type: none"> • Configuración compacta y usos mixtos • Calles anchas y proporcionadas • Posibilidad de ganancias solares, ventilación natural en las orientaciones favorables • Edificios con fachadas con diferentes orientaciones implican mayores ganancias solares • Áreas verdes y espacios abiertos en el entorno urbano 	<ul style="list-style-type: none"> • Mal comportamiento energético si la retícula urbana está mal orientada

PF: Plurfamiliar; UF: Unifamiliar

Tabla 5.3 Tipologías y características de las manzanas urbanas identificadas en la ciudad (continuación)

Tipología de MU	Situación	Edificio	Densidad	Descripción	Ventajas (Higuera, 2006)	Inconvenientes (Higuera, 2006)
MU 4	<ul style="list-style-type: none"> • Centro histórico • Barrios periféricos 	PF/UF	Media	<ul style="list-style-type: none"> • Forma irregular, calles estrechas, edificios de baja altura • Principalmente viviendas unifamiliares entre medianeras • Edificios entre medianeras de media-alta altura con pequeños patios de luces propios de los edificios 	<ul style="list-style-type: none"> • Configuración compacta y usos mixtos • Calles peatonales sin tráfico 	<ul style="list-style-type: none"> • Ganancias solares y ventilación natural limitada • Escasez de áreas verdes y espacios abiertos
MU 5	<ul style="list-style-type: none"> • Nuevos desarrollos urbanos • Barrios periféricos 	PF	Media	<ul style="list-style-type: none"> • Edificios plurifamiliares aislados en condominios cerrados. La manzana está formada por un grupo de edificios con parcela propia (zonas comunes exteriores) • Edificios entre medianeras de media-alta altura. 	<ul style="list-style-type: none"> • Permite orientar los edificios a las mejores condiciones solares • Áreas verdes que mejoran el microclima 	<ul style="list-style-type: none"> • Mal comportamiento energético si la retícula urbana está mal orientada • Los edificios altos generan corrientes de viento que pueden implicar disconfort en ciertos momentos del año • Los edificios aislados tienen mayores pérdidas energéticas • Variedad de usos pobre, falta de equipamiento
MU 6	<ul style="list-style-type: none"> • Nuevos desarrollos urbanos • Barrios periféricos 	PF	Baja	<ul style="list-style-type: none"> • Viviendas unifamiliares aisladas o pareadas 	<ul style="list-style-type: none"> • Permite orientar los edificios a las mejores condiciones solares • Áreas verdes que mejoran el microclima 	<ul style="list-style-type: none"> • Desaprovechamiento del suelo debido a la baja densidad • Los edificios aislados y poco compactos tienen mayores pérdidas energéticas • Variedad de usos pobre, falta de equipamiento
MU 7	<ul style="list-style-type: none"> • Nuevos desarrollos urbanos 	PF	Baja	<ul style="list-style-type: none"> • Viviendas unifamiliares entre medianera o en hilera 	<ul style="list-style-type: none"> • Permite orientar los edificios a las mejores condiciones solares • Áreas verdes que mejoran el microclima 	<ul style="list-style-type: none"> • Desaprovechamiento del suelo debido a la baja densidad • Variedad de usos pobre, falta de equipamiento

PF: Plurifamiliar; UF: Unifamiliar

5.3.4 I.4 ESCALA DE EDIFICIO

Para caracterizar las tipologías edificatorias, se aplica el procedimiento definido en la Figura 4.4 del Capítulo 4. Son dos los parámetros tenidos en cuenta para realizar dicha caracterización: la clase edificatoria y el año de construcción. La obtención de ambos aspectos se expone en los dos apartados siguientes.

5.3.4.1 Identificación de la clase de edificio

Los criterios que se establecen para caracterizar a los edificios son:

- tipo de ocupación (plurifamiliar o unifamiliar)
- tipo de adyacencia (aislado o entre medianeras)
- número de plantas

El número de plantas tomado como límite para establecer la clasificación de los edificios es de 4. El criterio tomado se basa en la existencia o no de ascensor en el edificio, pues la disposición del mismo en edificios antiguos era únicamente obligatoria en edificios con más de 4 plantas, lo que tiene como consecuencia que existan muchos edificios no mayores de 4 plantas en el paisaje urbano.

Así, estos tres criterios definen las dimensiones y la morfología del edificio, lo que llevará asociado un factor de forma (S/V), el cual define el grado de compacidad del mismo. Los edificios plurifamiliares implican mayor tamaño que las viviendas unifamiliares, lo que hará que tengan distintas ratios S/V . Por otro lado, se considera que un edificio de hasta 4 plantas es relativamente bajo, lo que implicará menor compacidad (mayor S/V), y a partir de 4 plantas es alto, lo que le concederá al edificio mayor compacidad (menor S/V). Por último, la adyacencia influirá en el intercambio de calor entre el interior del edificio y el ambiente exterior, pues un edificio aislado tiene mayor porcentaje de superficie de envolvente en contacto con el exterior que un edificio entre medianeras.

Al tipo de ocupación y adyacencia, aspectos de clasificación establecidos por la DGC (2014) (Tabla 4.4 del Capítulo 4), se le añade en número de plantas, lo que da lugar a un total de 6 clases de edificios, tal y como se recoge en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4 Obtención de clases de edificio

Ocupación	Adyacencia	Nº plantas	Clase edificatoria
PF	Aislada	≤ 4	PF _{A(≤4)}
		> 4	PF _{A(>4)}
	Entre medianeras	≤ 4	PF _{M(≤4)}
		> 4	PF _{M(>4)}
UF	Aislada	≤ 4	UF _{A(≤4)}
	Entre medianeras	≤ 4	UF _{M(≤4)}

La descripción de las características de cada clase de edificio, así como su ubicación habitual dentro de los tipos de barrio, se recoge en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5 Identificación de clases de edificios

Clase de edificio	Situación	MU	PF/ UF	Adyacencia	Nº plantas
PF _{A(≤4)} 	<ul style="list-style-type: none"> • Nuevos desarrollos urbanos • Barrios periféricos 	MU5	PF	Aislado	≤ 4
PF _{A(>4)} 	<ul style="list-style-type: none"> • Nuevos desarrollos urbanos • Barrios periféricos 	MU5	PF	Aislado	>4
PF _{M(≤4)} 	<ul style="list-style-type: none"> • Centro histórico • Ensanche próximo al centro histórico • Barrios periféricos 	MU1 MU2 MU4	PF	Entre medianeras	≤ 4
PF _{M(>4)} 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensanche próximo al centro histórico • Centro histórico 	MU1 MU2 MU3 MU4	PF	Entre medianeras	>4
UF _{A(≤4)} 	<ul style="list-style-type: none"> • Nuevos desarrollos urbanos • Barrios periféricos 		UF	Aislado	≤ 4
UF _{M(≤4)} 	<ul style="list-style-type: none"> • Nuevos desarrollos urbanos • Barrios periféricos • Centro histórico 		UF	Entre medianeras	≤ 4

5.3.4.2 Delimitación de los periodos temporales

El segundo de los aspectos para caracterizar las tipologías edificatorias es el año de construcción del edificio. Este proporcionará información muy útil sobre las características constructivas de la envolvente del edificio, condicionadas por la normativa en vigor en dicho periodo, en cuanto al uso de aislamiento térmico y tipo de materiales constructivos empleados. De hecho, no pueden entenderse las soluciones constructivas que conforman un edificio sin previamente fijar la mirada en el desarrollo y la evolución en el tiempo de la región objeto de estudio.

Así, la clasificación en periodos de construcción viene condicionada por factores de diversa índole que han tenido influencia en el desarrollo urbano de la región, atendiendo a razones tanto históricas

(hitos históricos y políticos), como normativas (entrada en vigor de nueva legislación, planes generales urbanísticos, etc.), como económicas.

En cuanto a las razones históricas, se deberá prestar atención a aquellos hechos que hayan marcado la evolución constructiva de la zona urbana, como son las guerras, el movimiento migratorio rural-urbano o la aparición de nuevas técnicas constructivas y materiales.

En la Comunidad Valenciana, la evolución histórica desde comienzos del siglo XX ha condicionado fuertemente la forma de construir los edificios, de manera que se aprecia un notable cambio sobre todo durante la década de los 50, cuando la construcción con hormigón armado comienza a tomar fuerza (Instituto Valenciano de la Edificación, 2011).

Hasta finales del siglo XIX, los edificios estaban constituidos por estructuras de muros de carga de fábrica de ladrillo cerámico (visto, en la mayoría de las ocasiones) y vigas de madera, que fueron sustituyéndose progresivamente por vigas y cerchas de acero laminado. La elevación de los edificios no sobrepasaba las seis plantas de altura. Las fachadas las constituían los propios muros de carga, ejecutados con fábricas gruesas de hasta 2 pies de espesor, de una sola hoja sin aislamiento térmico y rigidizadas por las medianeras y la propia tabiquería interior de las viviendas. Las cubiertas descansaban sobre las vigas de madera o metálicas, siendo, o bien inclinadas con falso techo de cañizo y yeso, o bien planas con cámara de aire ventilada y solado apoyado sobre tabiquillos conejeros ("a la catalana"). Las carpinterías exteriores eran fundamentalmente de madera e incorporaban vidrios monolíticos, los cuales proporcionaban baja resistencia térmica.

Desde principios del siglo XX hasta los años 1940, finalizada la Guerra Civil española, las estructuras con muros de carga seguían implantadas en todo el país. A pesar de la aparición de las primeras industrias cementeras en España, en la Comunidad Valenciana la primera cementera no se instala hasta el año 1922 (Temes Cordovez, 2009). Antes de la guerra de 1936, este territorio tenía que importar la mayoría del cemento que consumía, hasta que, tras la guerra, se instalan nuevas industrias cementeras para dar respuesta a la creciente demanda de cemento, frente a la alta demanda de vivienda. Es en la década de los 40 cuando más se evidencia el consumo de cemento, como consecuencia de la aprobación del nuevo régimen del Plan de Obras Públicas y el Plan Nacional de Ordenación y Reconstrucción (Box, 2012), los cuales hacen una fuerte apuesta por el uso del hormigón como material para construir tanto viviendas como obras públicas.

El fin de la Guerra Civil y la llegada del Franquismo suponen un momento importante para la arquitectura y la construcción en España, ya que el nuevo régimen aboga por la reconstrucción de las ciudades siguiendo la nueva ideología. En 1939 se crea el Instituto Nacional de la Vivienda, la Dirección General de Arquitectura y la Dirección General de Regiones Devastadas y Reparaciones. Con la creación de dichos organismos, se aprueba el Plan Nacional de Ordenación y Reconstrucción que, junto con la Asamblea de Madrid, sienta las bases de la arquitectura y el urbanismo inmediato a la posguerra.

La protección de las industrias cementeras consideradas de interés nacional, lleva al Instituto Nacional de la Vivienda a introducir en los años 1941-1943 Decretos y Órdenes para la limitación del uso del hierro en edificación, también debido a la escasez de material, y potenciar el uso del hormigón armado. Así pues, es a partir de esta época cuando el hormigón armado toma fuerza como material para proyectar y ejecutar estructuras de edificios.

Las primeras estructuras en hormigón armado son porticadas con luces de entre 3 y 4 metros, con vigas de canto para zunchar los forjados y servir como soporte para el apoyo de las fachadas, las cuales dejan de asumir una función estructural para convertirse en cerramientos no portantes. Se imponen también los forjados con viguetas de hormigón y entrevigado con bovedillas de yeso, cerámica u hormigón. Las fachadas pasan a ser muros de doble hoja, estando la hoja exterior constituida por fábrica de $\frac{1}{2}$ o 1 pie mientras que la interior, por fábrica de ladrillo hueco sencillo

(generalmente de 4 cm de espesor). Durante esta época, la cámara de aire intermedia todavía no incorpora aislamiento térmico, el cual no llegará a instaurarse hasta dentro de cuatro décadas. También durante esta década comienza a generalizarse el uso de la cubierta plana, ejecutándose de una sola hoja debido a la aparición del hormigón aligerado, que permite crear una superficie para la formación de pendientes, así como para la capa de impermeabilización, sobre la que descansa el pavimento. Se introducen también en este período las carpinterías de hierro y aluminio, correderas y abatibles, que implican bajo aislamiento térmico y alta permeabilidad al aire.

Todas las restricciones en el uso de materiales llegan a menguar considerablemente la calidad de las estructuras construidas, originando un gran mercado negro paralelo, no existiendo controles de calidad ni tampoco personal cualificado en el país para trabajar con nivel aceptable la nueva técnica del hormigón armado. Así pues, el resultado de estas dos décadas, entre los años 40 y 60, es un aumento progresivo de las estructuras de hormigón en los edificios, pero de muy baja calidad constructiva.

En 1957 llegan las Normas Técnicas del Sector de la Edificación (MV) (Ministerio de la Vivienda, 1957), desarrolladas por la Dirección General de Arquitectura, dependiente entonces del Ministerio de Gobernación. Diez años más tarde y como consecuencia del uso generalizado del hormigón, se crea la EH-68 (Gobierno de España, 1968), la primera Instrucción para el proyecto y ejecución de estructuras de hormigón armado. De esta forma, por primera vez, comienza a regularse normativamente la actividad de la construcción.

En la década de los 70, las estructuras porticadas de hormigón armado alcanzan mayores luces, entre los 4 y 5 metros, elevándose también en altura. Las fachadas ven reducido el espesor de su hoja principal exterior, incorporando a su vez un revoco de mortero en su cara interior para contrarrestar el riesgo por humedad. En el año 1972 ven la luz las Normas Tecnológicas de la Edificación (NTE) (Ministerio de Vivienda, 1972) con carácter recomendatorio y en 1977 las NBE Normas Básicas de la Edificación (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1977), de obligado cumplimiento. Con las segundas, llega la Norma Básica sobre Condiciones Térmicas en los Edificios (NBE-CT-79, 1979), que supone la obligatoriedad de incorporar aislamiento térmico y limitar así las pérdidas térmicas a través de los cerramientos. Al final de esta década, consecuencia de la introducción de patentes en los productos de impermeabilización y aislamiento térmico, surge la cubierta invertida, que implica una mejora considerable en la durabilidad de las azoteas. Las carpinterías de madera y hierro comienzan a ser sustituidas por carpinterías de aluminio, manteniéndose los vidrios monolíticos de bajas prestaciones.

Así pues, los años 80 suponen un cambio en las condiciones constructivas de los edificios. La forma reglada de ejecutar los elementos constructivos según las nuevas normas de edificación, la incorporación del aislamiento térmico en la envolvente térmica y la reglamentación del hormigón armado, hacen aumentar la calidad en la edificación. Las estructuras ven incrementadas sus luces, entre 5 y 6 metros, y se instauran las vigas planas (lo que también comporta mayores deformaciones en las fábricas). Las fachadas y cubiertas incorporan ya aislamiento térmico y las carpinterías comienzan a incorporar vidrios dobles con cámara de aire intermedia. La tabiquería interior adopta un mayor espesor (de 4 a 7 cm o incluso 11 cm) para alojar el paso de instalaciones.

Durante los años 90, las estructuras adquieren mayor esbeltez y comienza a hacerse uso de los tabiques ligeros de cartón-yeso para trasdosar la hoja principal de fachada y como tabiquería interior. Las carpinterías aportan mejores prestaciones, las metálicas incorporan la opción de rotura de puente térmico, vidrios dobles normales o bajo emisivos, y las carpinterías de PVC, cámaras de aire intermedias, para proporcionar mayor aislamiento e impermeabilidad al aire.

Cuando desde Europa los requerimientos se endurecen y surge la EPDB 2002 relativa a la eficiencia energética de los edificios (Comisión Europea, 2002), esta se transpone en España en el año 2006 a

través del CTE (CTE, 2006), el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (Ministerio de la Presidencia, 2007) y el Procedimiento Básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios (Ministerio de la Presidencia, 2013), como ya se indica en el Capítulo 2. Con la entrada en vigor del CTE y su DB HE1, se limita expresamente la demanda de energía en los edificios, con el objetivo de reducir los consumos energéticos y limitar las emisiones de CO₂, indicadores que deberán ser demostrados con la certificación energética del edificio.

Las prestaciones de la envolvente térmica mejoran en los edificios construidos a partir de la entrada en vigor del CTE, por la obligatoriedad de aumentar los espesores de aislamiento térmico según la zona climática en la que se ubica el edificio, limitar el riesgo de condensaciones y mejorar las características de los huecos.

Por otro lado, en septiembre de 2013 se aprueba una modificación del CTE con respecto al DB HE, que introduce cambios sustanciales y más restrictivos en las exigencias térmicas de la envolvente de los edificios. Sin embargo, debido al poco número de edificios de nueva planta construidos con los requisitos del CTE de 2013, este período no se diferencia expresamente en la clasificación propuesta en este trabajo.

Las consideraciones anteriores se recogen de forma gráfica en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6 Evolución temporal de los sistemas constructivos en edificios residenciales

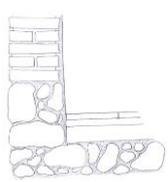
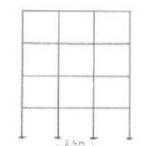
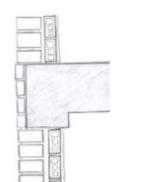
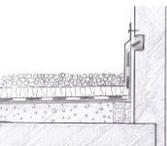
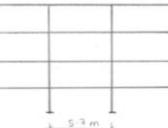
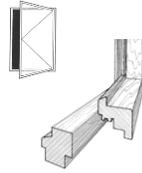
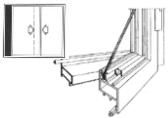
Periodo temporal	Estructura	Fachada	Cubierta	Normativa	Datos históricos
Finales S.XIX	Muros de carga de mampostería o de ladrillo (reducción de 2 a 1 pie a medida que se crece en altura). Altura hasta 6 plantas. Vigas y cerchas de madera y acero laminado.	Elemento estructural. 1 hoja. Sin aislamiento térmico.	Cubiertas inclinadas con viguetas y rollizos de madera/perfiles laminados de acero, y falso techo de cañizo y yeso. Cubiertas planas "a la catalana" ventiladas con solado sobre tabiquillos conejeros.	-	Revolución industrial, expansión económica.
1900-1910	Muros de carga de ladrillo, enfoscados y revocos.			-	Estilos arquitectónicos: - Modernismo y eclecticismo
1910-1920	Ligera introducción del acero.			-	- Sección vienesa
1920-1930				-	- Racionalismo en arquitectura
1930-1940				1939 Creación Instituto Nacional de la Vivienda: Comienza la construcción de miles de viviendas sociales protegidas. 1939 Dirección General de Arquitectura del Mº de Gobernación.	1931-1939 República española 1936 Guerra civil española Estilos arquitectónicos: - Expresionismo - Racionalismo (influencia internacional)
1940-1950	Muros de carga de ladrillo, enfoscados y revocos. Introducción del acero. Hormigón armado, estructuras porticadas con luces de 3-4 metros. Vigas de canto/colgadas. Entrevigados de bovedillas de yeso, hormigón y cerámicas. (Frentes de forjados chapado de piedra, en ocasiones)	Elemento NO estructural. Doble hoja: ½-1 pie + LH4. Sin aislamiento térmico.	Cubierta inclinada caliente (soporte inclinado). Cubierta inclinada fría con cámara de aire ventilada (soporte horizontal y cerchas maderas/tabiques conejeros). Cubierta plana "a la catalana" ventilada.	Plan de Obras Públicas. Plan de Ordenación y Reconstrucción Nacional. Decreto limitación uso hierro en edificación (1941).	Autarquia española-dictadura (1940-57) Escasez de material como consecuencia de la guerra. Aparición hormigón aligerado para cubiertas. Estilos arquitectónicos (1940-57): - Expresionismo. - Racionalismo - Arquitectura franquista
1950-1960			Cubierta inclinada caliente/fría. Cubierta plana "a la catalana" ventilada. Incorporación barrera de vapor entre forjado y hormigón de pendientes.	MV(1957) Normas técnicas del sector de la edificación.	MV Desarrolladas por la Dirección General de Arquitectura del Mº de Gobernación. Grandes programas de urbanismo y vivienda social Incorporación calefacción en viviendas y aumento presión de vapor. Éxodo rural-urbano. 1958 Liberalización económica (fin autarquía). 1957 Plan de Estabilización (Ministro de Hacienda Ullastres)
1960-1970			Idem anterior. Extensión uso cubierta plana.	EH-68 Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado	Prefabricación de viguetas, reducción volumen de hormigón. Cemento aluminoso. Éxodo rural-urbano
1970-1980	Hormigón armado, estructuras porticadas con luces de 4-5 metros. Vigas de canto. Crecimiento en altura.		Elemento NO estructural. Doble hoja: ½ pie + revoco antihumedad + LH4. Hoja principal semivolada. Comienza a introducirse aislamiento térmico.	Idem anterior. Cubierta plana invertida. Cubierta plana a la madrileña.	1977 Creación Normas Básicas de la Edificación NBE (RD 1650/1977 sobre Normativa de la Edificación) y Normas Tecnológicas de la Edificación NTE NBE-CT-79 (entrada en vigor)
1980-1990	Hormigón armado, estructuras porticadas con luces de 5-6 metros. Frente forjado revestido con plaquetas de 30mm. Deformación fábricas. Vigas planas.	Elemento NO estructural. Doble hoja: ½ pie + revoco antihumedad + LH4/LH7. Hoja principal semivolada. Aislamiento proyectado en trasdós hoja exterior. Introducción paneles de cartón-yeso en hoja interior.		NBE-CT-79 (puesta en práctica)	Estilos arquitectónicos: - Arquitectura contemporánea. Introducción patentes impermeabilización. Éxodo rural-urbano.
1990-2006	Hormigón armado, estructuras más esbeltas y mayor número de plantas.				Estilos arquitectónicos: - Arquitectura contemporánea. Introducción patentes de impermeabilización.
2006-actual			Cubierta plana invertida.	Transposición Directiva Europea 2002/91/CE: CTE (RD 314/2006) RITE (RD 1027/2007) CEE (RD 235/2013)	

Tabla 5.6 Evolución temporal de los sistemas constructivos en edificios residenciales (continuación)

Periodo temporal	Particiones horizontales	Particiones verticales	Huecos	Normativa	Datos históricos
Finales S.XIX	Forjados con entrevigado de madera/metálico, revoltones de ladrillo tomados con yeso. Cara inferior vista (revoltones enlucidos, viguetas barnizadas). O falso techo cañizo.	Medianeras estructurales de ½ pie. Particiones estructurales para rigidizar los muros, y particiones no estructurales de distribución. De ladrillo macizo de 3cm a panderete.	Carpintería de madera con vidrio monolítico. Abatibles. 	-	Revolución industrial, expansión económica.
1900-1910					Estilos arquitectónicos: -Modernismo y eclecticismo -Secesión vienesa -Racionalismo en arquitectura
1910-1920	Sustitución revoltones cerámicos por bovedillas de yeso.				Estilos arquitectónicos: -Modernismo y eclecticismo -Secesión vienesa -Racionalismo en arquitectura
1920-1930					Estilos arquitectónicos: -Modernismo y eclecticismo -Secesión vienesa -Racionalismo en arquitectura
1930-1940				1939 Creación Instituto Nacional de la Vivienda: Comienza la construcción de miles de viviendas sociales protegidas. 1939 Dirección General de Arquitectura del Mº de Gobernación.	1931-1939 República española 1936 Guerra civil española Estilos arquitectónicos: -Expresionismo -Racionalismo (influencia internacional)
1940-1950	Forjados de viguetas cerámicas armadas y viguetas de hormigón armado in situ, sin capa de compresión. Bovedillas de yeso, hormigón y cerámicas. Aumento en el canto del forjado. Ídem anterior	Medianeras de 1 hoja de LH11 sin revestir. Particiones de LH4 Núcleo de escalera rigidizador.		Plan de Obras Públicas. Plan de Ordenación y Reconstrucción Nacional. Decreto limitación uso hierro en edificación (1941).	Autarquia española-dictadura (1940-57) Escasez de material como consecuencia de la guerra. Aparición hormigón aligerado para cubiertas. Estilos arquitectónicos (1940-57): -Expresionismo. -Racionalismo -Arquitectura franquista
1950-1960			Carpintería de madera, vidrio monolítico, abatibles y de guillotina. Carpintería de hierro, vidrio monolítico, abatible o corredera. Carpintería de aluminio, monolítico, corredera y abatible. Persianas. 	MV (1957) Normas técnicas del sector de la edificación.	MV Desarrolladas por la Dirección General de Arquitectura del Mº de Gobernación. Grandes programas de urbanismo y vivienda social Incorporación calefacción en viviendas y aumento presión de vapor. Éxodo rural-urbano. 1958 Liberalización económica (fin autarquía). 1957 Plan de Estabilización (Ministro de Hacienda Lillo)
1960-1970	Forjados aligerados con viguetas pretensadas (Levante), semiviguetas de hormigón armado y viguetas in situ.		Carpintería de hierro, vidrio monolítico, abatible o corredera. Carpintería de aluminio, vidrio monolítico, corredera y abatible.	EH-68 Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado	Prefabricación de viguetas, reducción volumen de hormigón. Cemento aluminoso. Éxodo rural-urbano
1970-1980	Bovedillas de hormigón y cerámicas.			1977 Creación Normas Básicas de la Edificación NBE (RD 1650/1977 sobre Normativa de la Edificación) y Normas Tecnológicas de la Edificación NTE NBE-CT-79 (entrada en vigor)	1976 Democracia. 1973: 1ª promoción de arquitectos de la ETSAV. Frutos a final de la década. Estilos arquitectónicos: -Arquitectura contemporánea. Introducción patentes impermeabilización. Éxodo rural-urbano.
1980-1990		Particiones de LH7 y LH11 (más espesor para albergar el paso de instalaciones)	Vidrios dobles 	NBE-CT-79 (puesta en práctica)	Estilos arquitectónicos: -Arquitectura contemporánea. Introducción patentes impermeabilización. Éxodo rural-urbano.
1990-2006		Ídem anterior. Introducción paneles de cartón-yeso. 	Carpinterías de aluminio. Carpinterías de PVC con 2-3 cámaras.		Estilos arquitectónicos: -Arquitectura contemporánea. Introducción patentes de impermeabilización.
2006-actual			Carpinterías de aluminio con RPT (rotura de puente térmico). Vidrios dobles, bajo emisivos, control solar. Evolución y mejores prestaciones.	Transposición Directiva Europea 2002/91/CE: CTE (RD 314/2006) RITE (RD 1027/2007) CEE (RD 235/2013)	

Atendiendo a estas consideraciones, se establece una clasificación en 5 periodos temporales, cada uno de los cuales recoge el conjunto de edificios construidos en las fechas que los definen. Dicha clasificación queda recogida en la Figura 5.9.

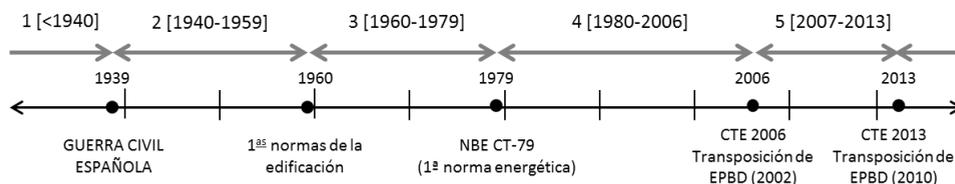


Figura 5.9 Periodos temporales de construcción propuestos

5.3.4.3 Obtención de la matriz de tipologías edificatorias

Cruzando los dos aspectos anteriormente definidos, las 6 clases de edificios y los 5 periodos temporales de construcción, se obtienen 30 tipologías edificatorias, como se muestra en la Figura 5.10.

Ocupación	Adyacencia	Nº plantas	Clase edificio	Año de construcción	Tipología edificatoria
PF	Aislada	≤ 4	PF _{A(≤4)}	1: <1940 2: 1940-1959 3: 1960-1979 4: 1980-2006 5: 2007-2013	30 tipologías: [1PF _{A(≤4)} , 2PF _{A(≤4)} , 3PF _{A(≤4)} , 4PF _{A(≤4)} , 5PF _{A(≤4)} , ..., 6UF _{M(≤4)}]
	Entre medianeras	> 4	PF _{A(>4)}		
UF	Aislada	≤ 4	UF _{A(≤4)}		
	Entre medianeras	≤ 4	UF _{M(≤4)}		

Figura 5.10 Obtención de las 30 tipologías edificatorias en la ciudad

Para poder identificar las tipologías edificatorias en el caso de estudio, se procede a generar la base de datos en entorno SIG con la herramienta gvSIG (Asociación gvSIG, 2014), para la totalidad de la ciudad. Los datos de entrada necesarios son obtenidos de la Dirección General del Catastro (DGC, 2014) en formato alfanumérico. Estos son, la referencia catastral (que va asociada a cada parcela y por tanto proporciona el resto de información en formato georreferenciado), la tipología de edificio (según la codificación catastral), el número de plantas (en números romanos), el año de construcción y la superficie construida (en m²). Sin embargo, la información disponible en la DGC no se encuentra en el formato correcto para ser interpretado por la herramienta SIG, por lo que resulta necesario una depuración y un tratamiento de los datos previamente a poder ser utilizados. Así, descargada la tabla de atributos que contiene la información catastral, son necesarias las operaciones siguientes:

1. Eliminación de la base de datos los inmuebles que no sean de uso residencial y codificar correctamente aquellos edificios que contengan usos distintos.
2. Conversión de la columna de la tabla de atributos que hace referencia al número de plantas, de un formato en números romanos a numérico (por ejemplo: de IV a 4).
3. Generación de la matriz de clases de edificios (ver Figura 5.11) y asignación de un código (A1, B3, C2, D4, ..., Zn). Para ello, se realizan dos filtrados (uno por número de plantas y otro por periodo de construcción) hasta obtener todas las tipologías:

- a. Primer filtrado. Según la nomenclatura definida por el catastro se clasifica a los edificios en: plurifamiliar aislado, plurifamiliar entre medianeras, unifamiliar aislado y unifamiliar entre medianeras. El filtrado consiste en desglosar los edificios plurifamiliares en cuatro categorías según su número de plantas. Para ello, la columna de la tabla de atributos referente a “tipología” se cruzará con la de “número de plantas” y, con ello, se obtiene un número determinado de capas en SIG, una por cada tipología edificatoria.
- b. Segundo filtrado. Cada una de las tipologías resultantes del primer filtrado se desglosa en tantas clases de edificios como periodos temporales de construcción se han establecido para el área urbana estudiada, en este caso, cinco. Así pues, se obtienen 30 clases de edificios:

$$[n^{\circ} \text{ tipologías edificatorias}] \times [n^{\circ} \text{ periodos temporales}] = [n^{\circ} \text{ clases edificio}]$$

Se obtendrá una capa SIG por cada tipología de edificio.

La Figura 5.11 sintetiza el procedimiento conceptual llevado a cabo en la herramienta SIG para la obtención de las clases de edificios.

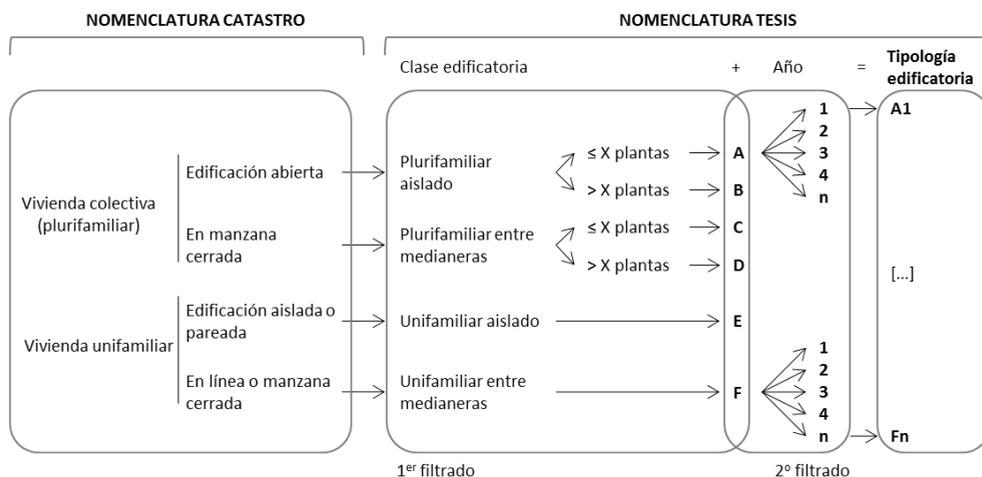


Figura 5.11 Procedimiento a seguir para la obtención de las clases de edificios en un SIG

El filtrado da como resultado la clasificación del conjunto de edificios que constituyen la ciudad, en base a su tipología edificatoria. La Figura 5.12 muestra la visualización de los edificios clasificados según su clase y la Figura 5.13 según su año de construcción. La Figura 5.14 muestra un ejemplo de la información de entrada contenida en la tabla de atributos, la cual se encuentra georreferenciada en base a la referencia catastral.



Figura 5.12 Visualización de las clases de edificios en el entorno SIG



Figura 5.13 Visualización de los años de construcción de los edificios en el entorno SIG

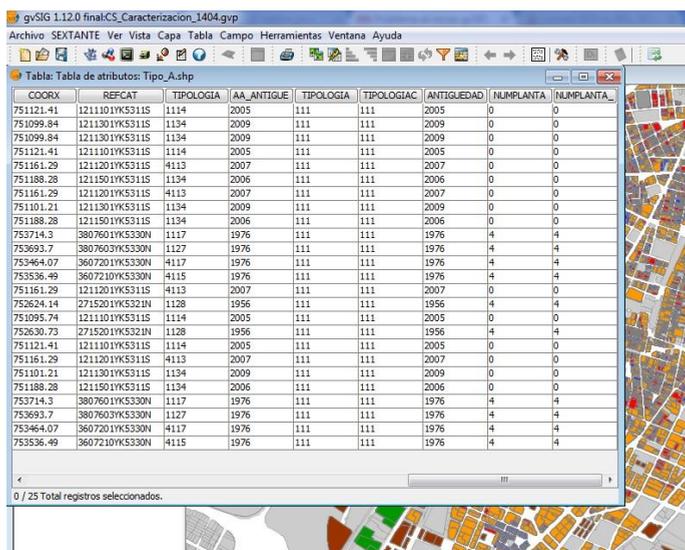


Figura 5.14 Ejemplo de la tabla de atributos en gvSIG

Generada la base de datos en entorno SIG, es posible caracterizar los edificios según la matriz de tipologías edificatorias e identificar el número de edificios contenidos en cada una de ellas. Tras eliminar de la base de datos todos aquellos edificios ubicados en barrios periféricos que no forman parte del núcleo urbano de Castellón, se contabilizan un total de 17.946 edificios. Los resultados de dicho filtrado se muestran en la matriz de la Tabla 5.7.

Tabla 5.7 Matriz de tipologías edificatorias en la ciudad

Periodo temporal	Clase de edificio						Total
	PF _{A(≤4)}	PF _{A(>4)}	PF _{M(≤4)}	PF _{M(>4)}	UF _{A(≤4)}	UF _{M(≤4)}	
1 [<1940]	-	-	443	16	63	3.537	4.059
2 [1940-1959]	2	12	836	137	63	2.016	3.066
3 [1960-1979]	8	90	887	2.917	20	994	4.916
4 [1980-2006]	2	489	534	2.560	33	1.038	4.656
5 [2007-2013]	-	181	182	445	211	230	1.249
Total	12	772	2.882	6.075	390	7.815	17.946

Claramente, se aprecia una tendencia ascendente en la construcción de edificios a lo largo del siglo XX, especialmente durante el periodo de construcción 3 (1960-1979), precisamente con anterioridad a la entrada en vigor de la NBE-CT-79. Ello trae como consecuencia que un 67,10% de los edificios carezcan de aislamiento térmico en su envolvente. El 25,94% de los edificios, los construidos en el periodo 4 (1980-2006), incorporan un tímido aislamiento térmico acorde a la NBE-CT-79 y solo el 6,96% restante se adaptan a los estándares del CTE (2006), lo que denota una baja calidad térmica de la envolvente del parque edificatorio residencial construido en Castellón de la Plana hasta la fecha. La evolución en el volumen edificado se muestra en la Figura 5.15.

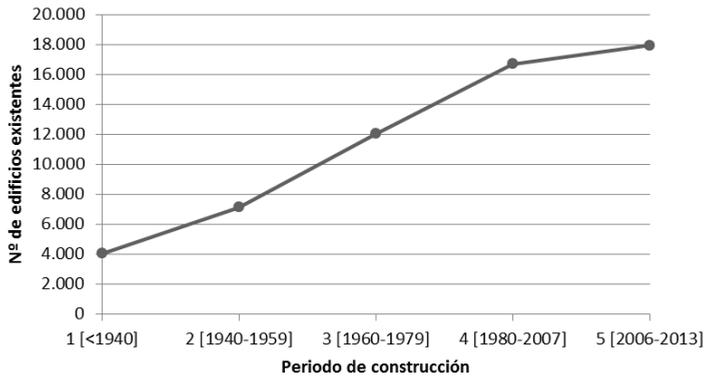


Figura 5.15 Evolución en la construcción de edificios en Castellón de la Plana

En cuanto a la clase edificatoria, de la matriz se extrae que las clases predominantes en la ciudad son la $PF_{M(\leq 4)}$ (edificios plurifamiliares entre medianeras de altura menor o igual a 4 plantas), la $PF_{M(>4)}$ (edificios plurifamiliares entre medianeras de más de 4 plantas) y la $UF_{M(\leq 4)}$ (viviendas unifamiliares entre medianeras), ya que juntas suponen el 93,46% de los edificios.

Cruzando los dos aspectos (clase y año de construcción) se obtiene que las tipologías de edificios más abundantes en la ciudad son las siguientes:

- $2PF_{M(\leq 4)}$
- $3PF_{M(\leq 4)}$
- $3PF_{M(>4)}$
- $1UF_{M(\leq 4)}$

Identificadas las tipologías predominantes, se selecciona en apartados siguientes, un barrio de la ciudad que contenga en un alto porcentaje dichas tipologías edificatorias, para que sea representativo.

5.3.5 I.5 CONFIGURACIÓN DE LA TAXONOMÍA URBANA REPRESENTATIVA

Identificadas las tipologías de manzana y las tipologías edificatorias, se puede establecer un esquema taxonómico que interrelacione las cuatro escalas de caracterización: ciudad, barrio, manzana urbana y edificio. La Figura 5.16 muestra las conexiones entre los elementos de estas cuatro escalas, estableciendo así las posibilidades de asociación entre manzanas urbanas y clases de edificios. La figura indica también algunos ejemplos de vivienda que se pueden encontrar en cada clase.

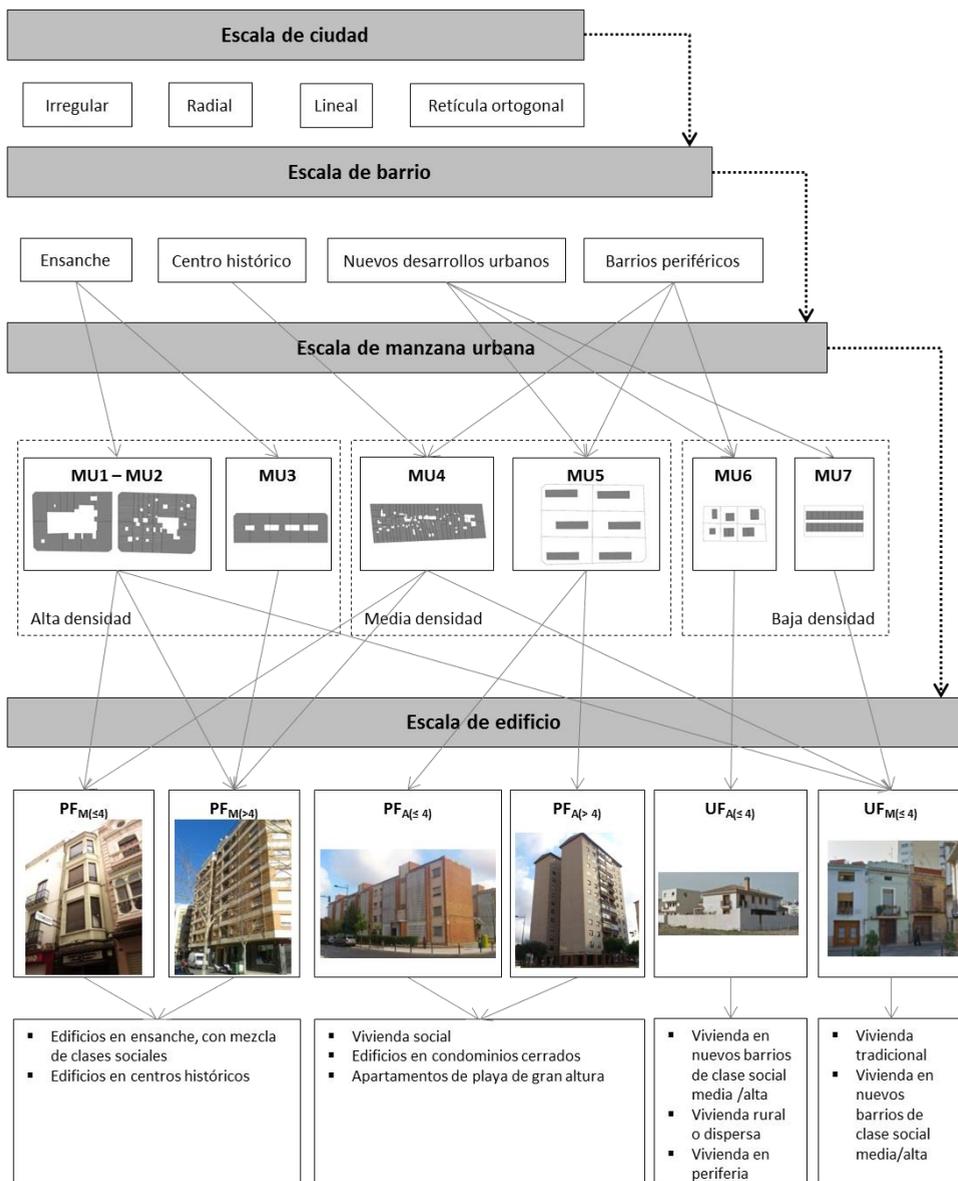


Figura 5.16 Taxonomía urbana de la ciudad de Castellón de la Plana

5.3.6 I.6 SELECCIÓN DE LOS EDIFICIOS REPRESENTATIVOS

Para concretar el caso de estudio, se selecciona un barrio de la ciudad. Para ello, se ha identificado un barrio que recoge las tipologías edificatorias más representativas de la ciudad ($PF_{M(\leq 4)}$, $PF_{M(>4)}$, $UF_{M(\leq 4)}$), el barrio “Parque del Oeste” (ver Figura 5.17).

El barrio se sitúa al sur del Hospital Provincial de Castellón y se extiende hacia el este. Queda delimitado por las calles Padre Jofre y Pelayo al norte, por la ronda Mijares y avenida de Valencia al este, por la calle Jacinto Benavente, Parque del Oeste y Escalante al sur, y por la Gran Vía de Tárrega Monteblanco al oeste.

El barrio se define como una amplia franja de ensanche de la ciudad de trazado claramente reticular que atiende a una malla ortogonal con manzanas rectangulares y achaflanadas en sus esquinas. Las edificaciones existentes son principalmente de uso residencial, aunque con usos mixtos, donde los edificios plurifamiliares de viviendas se combinan con actividades comerciales en sus plantas bajas y pequeños talleres de uso industrial. Existe una tipología muy clara de edificios, correspondiente a edificios adosados entre medianeras que conforman manzanas cerradas, entre los que se encuentran tanto viviendas unifamiliares de una a cuatro plantas como bloques de viviendas de distintos periodos de construcción que alcanzan mayoritariamente las ocho alturas.

Las calles son generalmente de anchura mediana, a excepción de las grandes avenidas que delimitan el barrio, que cuentan con anchos mayores. Las calles, a pesar de contar generalmente con dos carriles y aparcamiento, tienen aceras muy estrechas que no incorporan ningún tipo de arbolado.

En cuanto a equipamientos, el barrio cuenta con la proximidad del Hospital Provincial y de un colegio de educación primaria. Las zonas verdes son escasas, únicamente existe el Parque del Oeste situado en las proximidades y la zona verde vinculada al hospital.

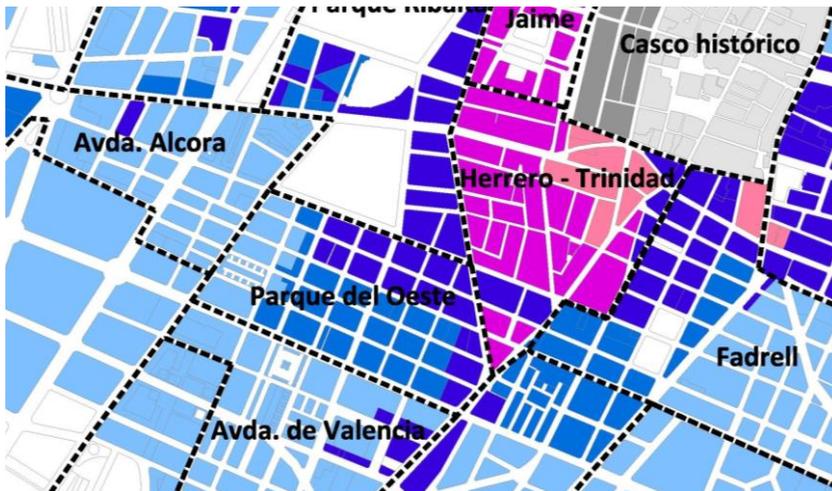


Figura 5.17 Ubicación del barrio Parque del Oeste en el contexto de la ciudad

Las tres tipologías de edificios identificadas en el barrio ($PF_{M(\leq 4)}$, $PF_{M(>4)}$, $UF_{M(\leq 4)}$) corresponden a edificios entre medianeras, pues al estar este constituido por manzanas cerradas, solo es posible encontrar estas clases edificatorias.

Los edificios seleccionados deben representar fielmente al conjunto de edificios contenidos en su clase. Así, con el objetivo de seleccionar tres edificios representativos, se ha llevado a cabo un análisis de la superficie construida por tipología edificatoria en todo el barrio, cuyos resultados se presentan en la Tabla 5.8. Se obtiene que la superficie construida media de las tres clases de edificios es de 338,74 m² para PF_{M(≤4)}, de 1.760,83 m² para PF_{M(>4)} y de 153,99 m² para UF_{M(≤4)}. De esta manera, se han seleccionado tres edificios reales cuya superficie construida se asimila a las tres anteriores (ver Figura 5.18), respectivamente.

Cabe indicar que la superficie construida a la que se refiere la tabla, hace referencia a la superficie construida de los espacios del edificio destinados únicamente a uso residencial, por lo que no se computan las plantas destinadas a aparcamiento y/o trastero, ni los locales comerciales o de otros usos que existen en las plantas bajas y entresuelos.

Tabla 5.8 Análisis de la superficie construida por tipología edificatoria en el barrio para selección de los edificios muestra representativos

Clase de edificio	Tipología edificatoria	Nº edificios	Sup. Construida por tipología destinada a uso residencial		Sup. Media por tipología (m ²)	Sup. Media por clase (m ²)
			(m ²)	%		
PF _{M(≤4)}	1PF _{M(≤4)}	21	4425	1,23%	210,71	338,74
	2PF _{M(≤4)}	38	8888	2,46%	233,89	
	3PF _{M(≤4)}	33	10771	2,98%	326,39	
	4PF _{M(≤4)}	18	10286	2,85%	571,44	
	5PF _{M(≤4)}	4	1405	0,39%	351,25	
PF _{M(>4)}	1PF _{M(>4)}	0	0	0,00%	0	1.760,83
	2PF _{M(>4)}	2	714	0,20%*	357*	
	3PF _{M(>4)}	91	115539	32,01%	1.269,66	
	4PF _{M(>4)}	73	153936	42,65%	2.108,71	
	5PF _{M(>4)}	9	17137	4,75%	1.904,11	
UF _{M(≤4)}	1UF _{M(≤4)}	136	16238	4,50%	119,40	153,99
	2UF _{M(≤4)}	86	10986	3,04%	127,74	
	3UF _{M(≤4)}	32	5191	1,44%	162,21	
	4UF _{M(≤4)}	24	4122	1,14%	171,75	
	5UF _{M(≤4)}	7	1322	0,37%	188,86	
Total		574	360.960	100,00%	360.960	

* Valor no considerado para obtener la superficie media, por ser atípico dentro de su clase.

La Figura 5.18 muestra una imagen de cada uno de los edificios seleccionados como representativos.



PF_{M(>4)} (2.006,61 m²)



PF_{M(≤4)} (337,98 m²)



UF_{M(≤4)} (165,24 m²)

Figura 5.18 Edificios muestra representativos y superficie construida

El edificio PF_{M(>4)} se construyó en el año 1971 y consta de ocho plantas sobre rasante distribuidas de la siguiente forma:

- Planta baja: constituida por un local comercial y el zaguán de acceso a las plantas de vivienda. La planta baja no se tendrá en consideración en el análisis energético, al no corresponder con un uso residencial, por lo que se define como un espacio no habitable, a efectos térmicos.
- Plantas tipo: existen 7 plantas tipo de vivienda, constituidas cada una de ellas por 4 viviendas, A, B, C, D. Las cuatro viviendas tienen huecos en la fachada principal del edificio; dos de ellas (A y D), además tienen huecos en la fachada posterior.

El edificio PF_{M(≤4)} se construyó en el año 1940 y consta de 3 plantas sobre rasante distribuidas de la siguiente forma:

- Planta baja: está constituida por un local comercial, una vivienda y el zaguán de acceso al resto de plantas de vivienda. El local comercial no se tendrá en consideración en el análisis energético, al no corresponder con un uso residencial, por lo que se define como un espacio no habitable.
- Plantas tipo: existen 2 plantas tipo de vivienda, constituidas cada una de ellas por 2 viviendas, A y B. Las dos viviendas tienen huecos tanto en la fachada principal del edificio como en la fachada posterior.

El edificio UF_{M(≤4)} se construyó en el año 1925 y consta de 4 plantas sobre rasante distribuidas de la siguiente forma:

- Planta baja: alberga dos locales comerciales, por lo que se define toda la planta como no habitable.
- Plantas primera y segunda: corresponden a una vivienda unifamiliar, con huecos tanto en la fachada principal como en la posterior.

- Planta bajo cubierta: forma parte de la vivienda, pero corresponde a una zona destinada a uso de almacén, por lo que se considera como un espacio no habitable a efectos del análisis energético.

Por otro lado, las manzanas presentes en el barrio responden a las tipologías MU₁ y MU₂, identificadas en la Tabla 5.3. La Figura 5.19 muestra estas tipologías de manzana y las clases de edificios que estas contienen.



Figura 5.19 Visualización en entorno SIG de las clases de edificios y tipologías de manzanas contenidas en el barrio

Para identificar la manzana típica que caracteriza el barrio, se determina el porcentaje de superficie construida de cada clase de edificio contenidos en cada una de las manzanas. La Tabla 5.9 muestra el número de edificios, la superficie construida en m² y % de superficie construida por cada tipología de edificio.

Tabla 5.9 Número de edificios, superficie construida (m²) y % de superficie construida por clase de edificio y por tipología de manzana

Año de construcción	Clase de edificio									
	PF _{M(>4)}			PF _{M(≤4)}			UF _{M(≤4)}			
	Nº	m ²	%	Nº	m ²	%	Nº	m ²	%	
MU1	1 (< 1940)	-	-	-	2	376	5,37%	14	1.442	30,42%
	2 (1940-1959)	-	-	-	7	1.885	26,91%	12	1.388	29,28%
	3 (1960-1979)	34	53.315	45,91%	7	2.326	33,20%	6	1.221	25,75%
	4 (1980-2006)	20	53.119	45,74%	4	1.992	28,44%	3	459	9,68%
	5 (2007-2013)	7	9.694	8,35%	1	426	6,08%	1	231	4,87%
		116.128	90,81%		7.005	5,48%		4.741	3,71%	
MU2	1 (< 1940)	-	-	-	21	4.419	12,36%	131	15.954	43,36%
	2 (1940-1959)	1	146	0,07%	30	6.724	18,81%	58	7.661	20,82%
	3 (1960-1979)	54	60.797	27,24%	27	8.656	24,21%	25	3.796	10,32%
	4 (1980-2006)	35	39.865	17,86%	13	7.972	22,30%	19	3.435	9,34%
	5 (2007-2013)	5	6.245	2,80%	3	979	2,74%	7	1.206	3,28%
		107.053	63,78%		28.750	17,12%		32.052	19,10%	

Se observa que la MU₁ está compuesta en su mayor parte (90,81%) por edificios plurifamiliares entre medianeras altos (PF_{M(>4)}), con algunos edificios plurifamiliares entre medianeras de menos de 4 plantas (PF_{M(≤4)}) y algunas viviendas unifamiliares (UF_{M(≤4)}). Se aprecia que las MU₁ son manzanas de más reciente creación, motivo por el que predominan los edificios de grandes dimensiones.

En la MU₂ abundan las viviendas unifamiliares tradicionales antiguas (UF_{M(≤4)}) y también tienen presencia los edificios plurifamiliares de baja altura (PF_{M(≤4)}), pues corresponden a las edificaciones principalmente antiguas ligadas al momento de la creación del barrio en los inicios del siglo XX, que dificultaron a posteriori la configuración de un gran patio de manzana. Sin embargo, los edificios plurifamiliares altos son también la clase predominante (63,78%) en esta manzana.

De hecho, si se superpone la tipología de manzana urbana al desarrollo histórico del barrio, se aprecia que las MU₂ están situadas precisamente al norte del barrio, por donde este comenzó a crearse, mientras que las MU₁ están situadas más hacia el sur, pues corresponden a una tipología más reciente de manzana. Los resultados de la Tabla 5.9 se indican gráficamente en la Figura 5.20.

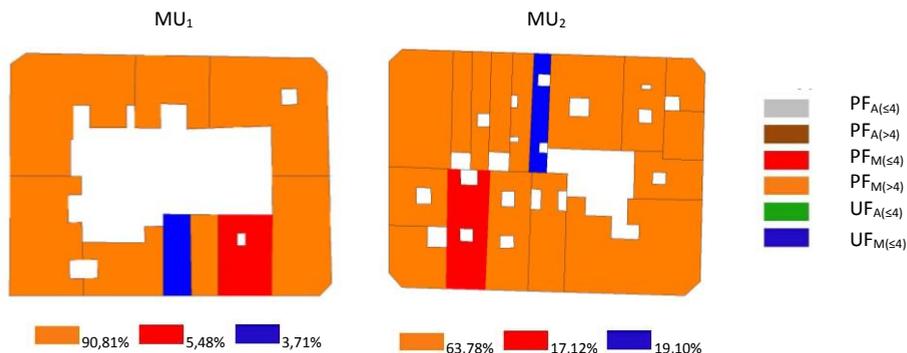


Figura 5.20 Configuración de las manzanas MU₁ y MU₂ en el barrio.

5.4 ETAPA II: EVALUACIÓN ENERGÉTICA

La caracterización del barrio da paso a la Etapa II de la metodología, en la que el área urbana es analizada energéticamente. Los resultados de esta Etapa II son los valores de los cuatro indicadores (o variables respuesta) que cuantificarán el comportamiento energético de las hipótesis de simulación dinámica:

- Demanda energética de refrigeración (DE_r), kWh/m²año
- Demanda energética de calefacción (DE_c), kWh/m²año
- Horas de disconfort en verano (HD_v), h/año
- Horas de disconfort en invierno (HD_i), h/año

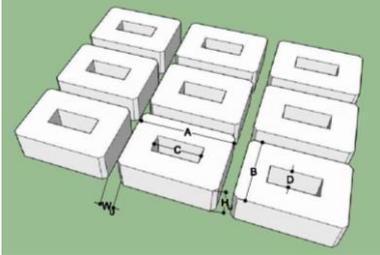
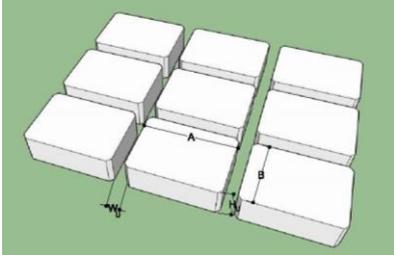
Tal y como se ha indicado en la descripción de la metodología en el capítulo 4, el programa de simulación utilizado para llevar a cabo esta etapa es EnergyPlus (U.S. Department of Energy, 2013) con la interfaz gráfica de DesignBuilder (DesignBuilder UK, 2015). Cada uno de los tres apartados siguientes corresponden a las tres sub-etapas de las que se compone la evaluación energética.

5.4.1 II.1 DEFINICIÓN DE LAS COVARIABLES

5.4.1.1 Definición de las covariables a nivel urbano

El barrio responde a una estructura ortogonal de manzanas que le confieren cierta regularidad y estructuración en su morfología. Como se desprende de la Etapa I, se identifican dos tipologías de manzana urbana cerrada, diferenciadas por la presencia o no de un patio de manzana (MU_1 y MU_2). Ambas manzanas tienen dimensiones muy similares, con ligeras variaciones que han sido simplificadas para llevar a cabo la simulación energética. MU_1 tiene un gran patio de manzana, mientras que MU_2 no presenta patio de manzana, sino pequeños patios de luces propios de los edificios que constituyen la manzana. Las características dimensionales de las dos tipologías se presentan en la Tabla 5.10. La máxima altura de edificación establecida por el PGOU es de 8 plantas, que corresponde a unos 24 m, la cual se ha tomado en las simulaciones como valor más alto posible que puede darse en el barrio. Además, se identifican dos anchos de calle, de 10 y 20 m, de manera que la combinación de ambos parámetros (altura y anchura) determinan dos ratios H/W de calle: 2,4 y 1,2, respectivamente.

Tabla 5.10 Características de las manzanas urbanas residenciales

Características	MU ₁		MU ₂	
Configuración				
Descripción	Gran patio de manzana		Pequeños patios de luces propios	
A (m)	70		70	
B (m)	50		50	
C (m)	34-38		-	
D (m)	14-18		-	
H _U Altura (m)	24		24	
W _U Anchura (m)	W _U =10	W _U =20	W _U =10	W _U =20
H _U / W _U	2.4	1.2	2.4	1.2

Definidas las covariables MU y H/W presentes en el barrio, falta definir la covariable O (orientación) para finalizar la caracterización de la morfología urbana. Según la Figura 3.11 del Capítulo 3, la orientación de la fachada principal de los edificios viene determinada por el ángulo que forma la normal a la fachada con el norte geográfico y corresponde con: norte ($300^\circ > \alpha \leq 60^\circ$), este ($60^\circ > \alpha \leq 135^\circ$), sur ($135^\circ > \alpha \leq 225^\circ$) y oeste ($225^\circ > \alpha \leq 300^\circ$). Con motivo de la configuración, la geometría rectangular de las manzanas no corresponde con la ortogonalidad del eje que determina la posición del norte geográfico, sino que estas están orientadas tal y como muestra la Figura 5.21, formando un ángulo de 24° con respecto al Sur. Así pues, existen cuatro orientaciones correspondientes a norte (154° E), sur (24° O), este (66° E) y oeste (114° O).

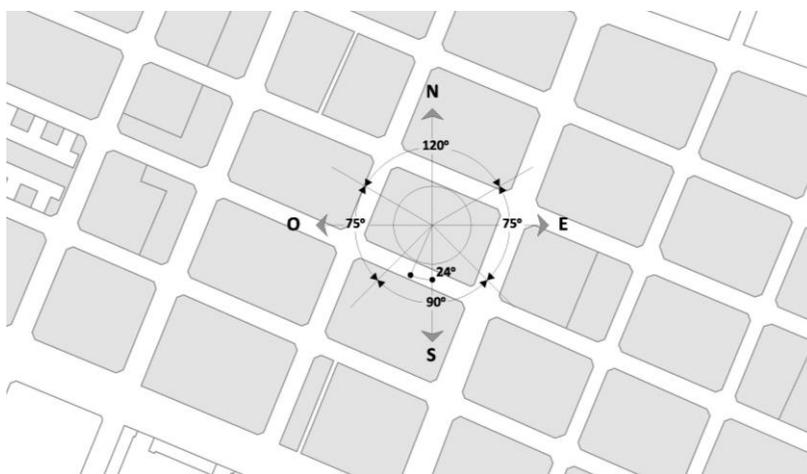
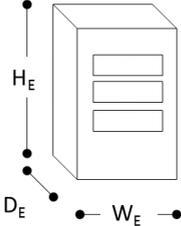
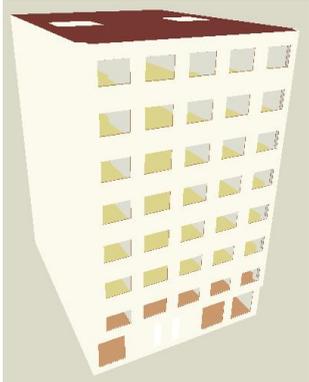
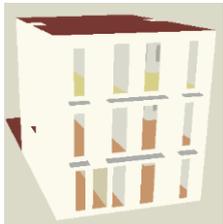


Figura 5.21 Orientación de las fachadas de los edificios en el barrio

5.4.1.2 Definición de las covariables a nivel de edificio

Seleccionados los edificios representativos, estos se caracterizan según sus dimensiones para así determinar la primera de las covariables, el factor de forma (S/V). La Tabla 5.11 resume sus características dimensionales, identificando el volumen (V) y la superficie de envolvente (S), que serán necesarios para obtener el factor de forma o compacidad del edificio.

Tabla 5.11 Características dimensionales de los edificios muestra $PF_{M(>4)}$, $PF_{M(\leq 4)}$ y $UF_{M(\leq 4)}$

Propiedades	$PF_{M(>4)}$	$PF_{M(\leq 4)}$	$UF_{M(\leq 4)}$
			
Ocupación	PF	PF	UF
S/V (m⁻¹)	0,26	0,30	0,40
Plantas sobre rasante	8	3	4
H _E Altura (m)	25	13,50	14,50
W _E Anchura (m)	15,90	11,80	4,00
D _E Profundidad (m)	21,50	14,70	30,50
Superficie habitable (m ²)	2.006,61	337,98	165,24
Volumen habitable (m ³)	4.931,69	1.628,72	473,05
Superficie envolvente (m ²)	1.282,83	478,19	160,38
Sup. elementos opacos (m ²)	741,50	272,90	94,00
Sup. acristalada (m ²)	293,80	102,90	32,10
% Acristalamiento	39,60	37,70	34,15

La geometría de cada uno de los edificios es generada en el software DesignBuilder, tal y como queda definida gráficamente en las Figura 5.22, Figura 5.23 y Figura 5.24.

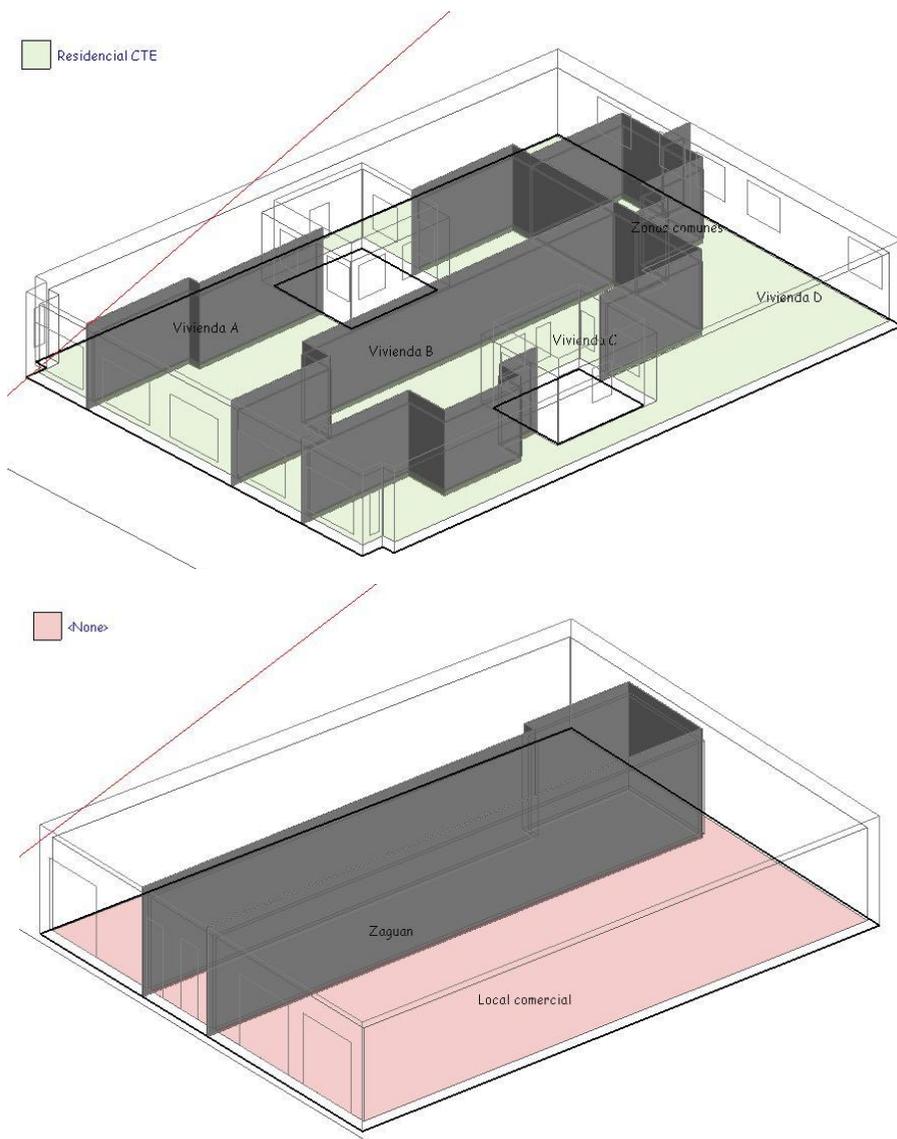


Figura 5.22 Planta baja (inferior) y planta tipo (superior) del edificio PF_{M(>4)}

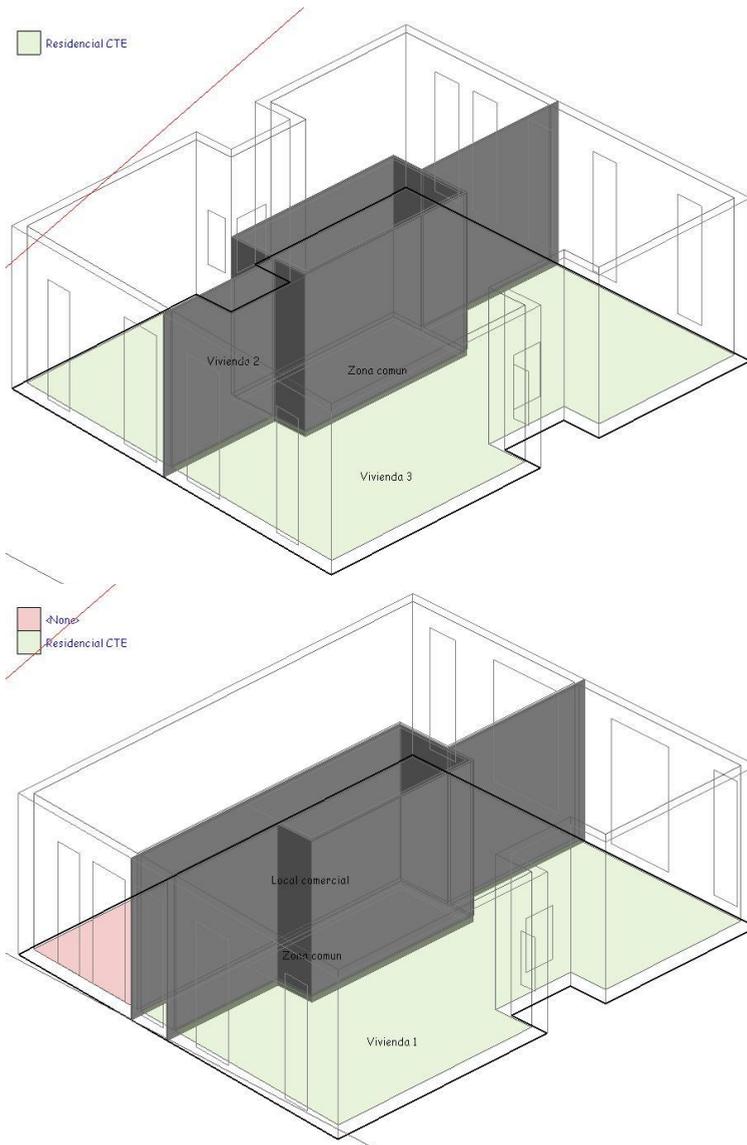


Figura 5.23 Planta baja (inferior) y planta tipo (superior) del edificio $PF_{M(\leq 4)}$

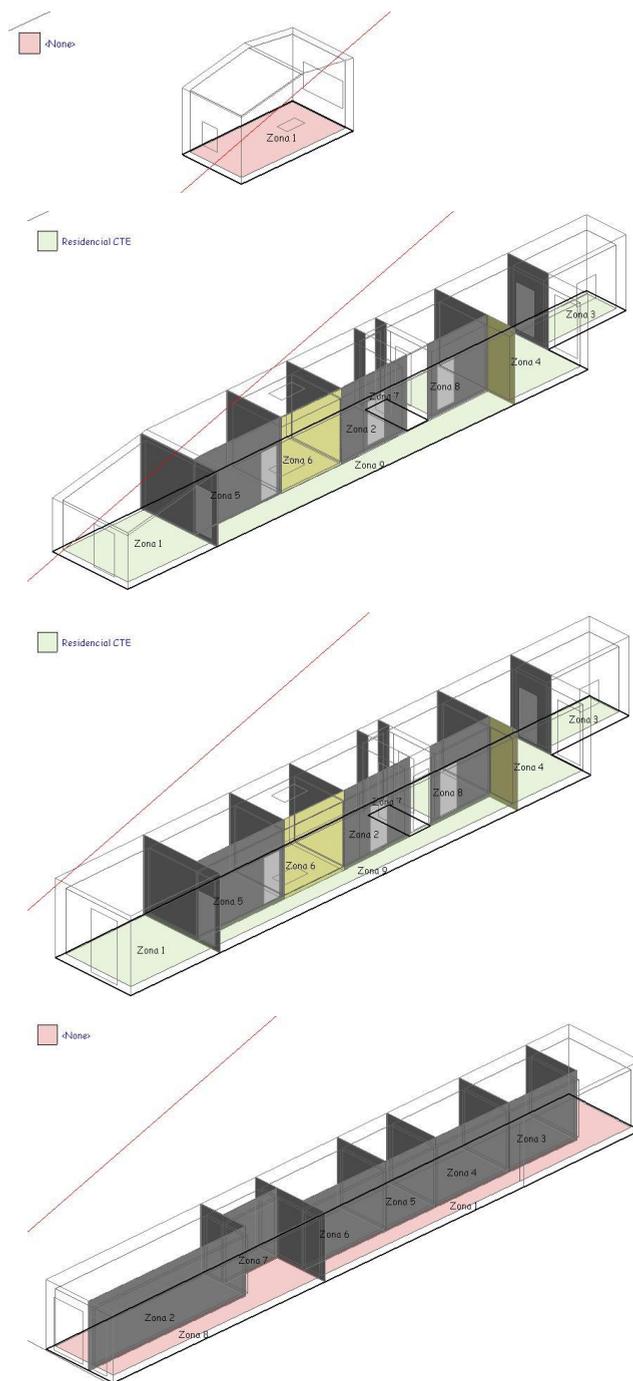


Figura 5.24 Planta baja, primera, segunda y bajo cubierta (de abajo a arriba) del edificio $UF_{M(54)}$

La segunda covariable a nivel de edificio es el año de construcción (A) y viene establecido en 5 periodos temporales, como se concluye en la Figura 5.9: 1 [anterior a 1940], 2 [1940-1659], 3 [1960-1979], 4 [1980-2006] y 5 [2007-2013]. Como establece la metodología, cada uno de estos periodos es caracterizado por el conjunto de soluciones constructivas típicas que definen los elementos del edificio. Así pues, cada una de las soluciones utilizadas habitualmente en cada periodo ha sido identificada (Tabla 5.6) y se ha calculado su transmitancia térmica (U), de manera que cada periodo queda identificado por un paquete de valores de U para los elementos de fachada, cubierta, suelos, particiones horizontales, particiones verticales y huecos. Los cinco paquetes de valores de U para cada uno de los periodos quedan recogidos en la Tabla 5.12. Los puentes térmicos han sido calculados según el método simplificado definido en la norma EN ISO 14683 (CEN, 2011) y quedan recogidos en la Tabla 5.13.

Tabla 5.12 Transmitancias térmicas de las soluciones constructivas contempladas en los cinco periodos temporales

	1 [<1940]			2 [1940-1959]		
FACHADA	Fachada: muro de carga			Fachada: cerramiento doble hoja (no estructural)		
	Capa	e (m)	U (W/m²k)	Capa	e (m)	U (W/m²k)
	Cement mortar	0,015	2,628	Ladrillo perforado	0,12	1,438
	Brick wall	0,24		Cámara de aire	0,05	
	Gypsum plastering	0,015		Ladrillo hueco LH4	0,04	
			Enlucido de yeso	0,015		
CUBIERTA	Cubierta: plana "a la catalana"			Cubierta: plana "a la catalana"		
	Capa	e (m)	U (W/m²k)	Capa	e (m)	U (W/m²k)
	Pavimento baldosín cerámico	0,01	0,987	Pavimento baldosín cerámico	0,01	0,823
	Capa de mortero de cemento	0,02		Capa de mortero de cemento	0,02	
	Impermeabilización	0,001		Impermeabilización	0,001	
	Soporte de bardos cerámicos	0,03		Soporte de bardos cerámicos	0,03	
	Cámara de aire ventilada	0,2		Cámara de aire ventilada	0,2	
	Tabiquillos conejeros	-		Tabiquillos conejeros	-	
	Forjado de viguetas de madera	0,2		Barrera de vapor	0,001	
	Cielo raso de cañizo y yeso	0,02	FU hormigón armado	0,25		
				Cielo raso de cañizo y yeso	0,02	
				Cubierta: inclinada sobre forjado horizontal		
	Capa	e (m)	U (W/m²k)	Capa	e (m)	U (W/m²k)
	Cobertura de teja curva	0,01	1,798	Cobertura de teja curva	0,01	1,215
Soporte de ladrillo cerámico	0,02	Capa de mortero de cemento		0,02		
Rastreles de madera	0,03	Impermeabilización		0,001		
Viguetas de madera	0,1	Soporte de bardos cerámicos		0,03		
Cielo raso de cañizo y yeso	0,02	Cámara de aire ventilada		0,5		
		Tabiquillos conejeros		-		
		Barrera de vapor		0,001		
		FU hormigón armado	0,25			
			Cielo raso de cañizo y yeso	0,02		
SUELOS	Solera hormigón			Solera hormigón		
	Capa	e (m)	U (W/m²k)	Capa	e (m)	U (W/m²k)
	Pavimento cerámico	0,01	2,23	Pavimento cerámico	0,01	2,23
	Hormigón armado 2300<d<2500	0,1		Hormigón armado 2300<d<2500	0,1	
Arena y grava	0,25	Arena y grava		0,25		
PARTICIONES HORIZONTALES	Forjado interior madera			Forjado interior cerámica		
	Capa	e (m)	U (W/m²k)	Capa	e (m)	U (W/m²k)
	Pavimento cerámico	0,01	1,479	Pavimento cerámico	0,01	1,606
	Capa de mortero de cemento	0,02		Capa de mortero de cemento	0,02	
	Entarimado de madera	0,02		FU HA bovedilla cerámica	0,25	
	Revolton de ladrillo cerámico macizo	0,02		Capa de yeso	0,015	
	Viguetas de madera 5x10cm	-				
Cielo raso de cañizo y yeso	0,02					
PARTICIONES VERTICALES	Medianeras: estructural de ladrillo de 1 hoja			Medianeras: no estructural, 1hoja ladrillo		
	Capa	e (m)	U (W/m²k)	Capa	e (m)	U (W/m²k)
	Ladrillo cerámico macizo/perforado	0,12	2,831	Ladrillo hueco LH11	0,11	2,226
	Enlucido de yeso	0,01		Enlucido de yeso	0,015	
			Tabique ladrillo LH3			
Capa	e (m)	U (W/m²k)	Capa	e (m)	U (W/m²k)	
Enlucido de yeso	0,01	3,01	Enlucido de yeso	0,015	2,483	
Ladrillo cerámico LH3	0,03		Ladrillo cerámico LH4	0,04		
Enlucido de yeso	0,01		Enlucido de yeso	0,015		
HUECOS	Carpintería abatible			Carpintería abatible		
	Capa	e (m)	U (W/m²k)	Capa	e (m)	U (W/m²k)
	Marco de madera		3,633	Marco de hierro		5,88
	Vidrio monolítico 4mm		5,7	Vidrio monolítico 4mm		5,7
			Hueco global (considerando un FM del 30%)		5,754	

Tabla 5.12 Transmitancias térmicas de las soluciones constructivas contempladas en los cinco periodos temporales (continuación)

5 [2007-2013]				
Fachada: cerramiento doble hoja (no estructural) aislada				
FACHADA	Capa	e (m)	U (W/m²k)	
	Ladrillo hueco LH11	0,11	0,546	
	Enfoscado mortero cemento	0,015		
	Cámara de aire	0,01		
	Aislamiento térmico (λ : 0,04 W/mk)	0,04		
	Ladrillo hueco LH7	0,07		
	Enlucido de yeso	0,015		
Cubierta: plana invertida				
CUBIERTA	Capa	e (m)	U (W/m²k)	
	Pavimento baldosín cerámico	0,01	0,512	
	Capa de mortero de cemento	0,02		
	Aislamiento térmico (λ : 0,04 W/mk)	0,05		
	Impermeabilización	0,001		
	Hormigón celular (formación ptes.)	0,05		
	FU hormigón armado	0,3		
	Capa de yeso	0,015		
	Cubierta: inclinada de teja e5cm			
	Capa	e (m)	U (W/m²k)	
	Coertura de teja curva	0,01	0,599	
	Capa de mortero de cemento	0,02		
	Aislamiento térmico (λ : 0,04 W/mk)	0,05		
	FU inclinado hormigón armado	0,03		
Capa de yeso	0,015			
Solera hormigón				
SUELOS	Capa	e (m)	U (W/m²k)	
	Pavimento cerámico	0,01	2,23	
	Hormigón armado 2300<d<2500	0,1		
	Arena y grava	0,25		
Forjado interior hormigón				
PARTICIONES HORIZONTALES	Capa	e (m)	U (W/m²k)	
	Pavimento cerámico	0,01	1,877	
	Capa de mortero de cemento	0,02		
	FU HA bovedilla hormigón	0,25		
	Capa de yeso	0,015		
Medianeras: no estructural, 2 hojas ladrillo, AT				
PARTICIONES VERTICALES	Capa	e (m)	U (W/m²k)	
	Enfoscado mortero cemento	0,015	0,576	
	Ladrillo hueco LH11	0,11		
	Cámara de aire	0,02		
	Aislamiento térmico (λ : 0,04 W/mk)	0,04		
	Ladrillo hueco LH4	0,04		
	Enlucido de yeso	0,015		
	Tabique ladrillo LH7			
	Capa	e (m)	U (W/m²k)	
	Enlucido de yeso	0,015	2,003	
Ladrillo cerámico LH7	0,07			
Enlucido de yeso	0,015			
Carpintería corredera				
HUECOS	Capa	e (m)	U (W/m²k)	
	Marco de aluminio		5,881	
	Vidrios dobles 4+6+4 mm		3,146	
			3,9665	

Tabla 5.13 Transmitancias térmicas de los puentes térmicos en los cinco periodos temporales

		Periodo temporal				
		1	2	3	4	5
PUENTES TÉRMICOS	Tipo de encuentro	Ψ (W/mk)				
	Cubierta-Fachada	0,8	0,82	0,77	0,87	0,89
	Fachada-Suelo terreno	1,55	1,92	1,92	2,13	2,2
	Esquina de fachada	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
	Fachada-Suelo (no terreno)	1,34	1,05	1,05	0,97	0,93
	Dintel en hueco	0,59	0,13	0,13	0,92	0,95
	Alféizar en hueco	0	0,8	0,8	0,2	0,23
	Jamba en hueco	0,17	0,43	0,43	0,48	0,49

5.4.1.3 Resumen de covariables para evaluar el comportamiento energético del barrio

La Tabla 5.14 resume los valores de las cinco covariables.

Tabla 5.14 Definición de covariables

Covariables				
MU	H/W	O	S/V	A
1	2.4 (H=24m; W=10m)	0° (N)	0.3	1 (<1940)
2	1.2 (H=24m; W=20m)	90° (E)	0.26	2 (1940-1959)
		180° (S)	0.4	3 (1960-1979)
		270° (W)		4 (1980-2006)
				5 (2007-2013)

5.4.2 II.2 PLANTEAMIENTO DE LAS HIPÓTESIS DE CÁLCULO

Acorde con la Figura 4.9 del Capítulo 4, se configura la Figura 5.25 teniendo en cuenta los valores que adoptan las cinco covariables. La combinación entre todas ellas da como resultado un total de 240 hipótesis, que representan todas las posibilidades de manzana, ratio H/W, orientación, factor de forma de los edificios y año de construcción. Esta simplificación permite evaluar toda la casuística del área urbana, para después desarrollar un modelo estadístico de predicción que permita estimar las variables respuesta en todos los edificios reales que existen en el barrio.

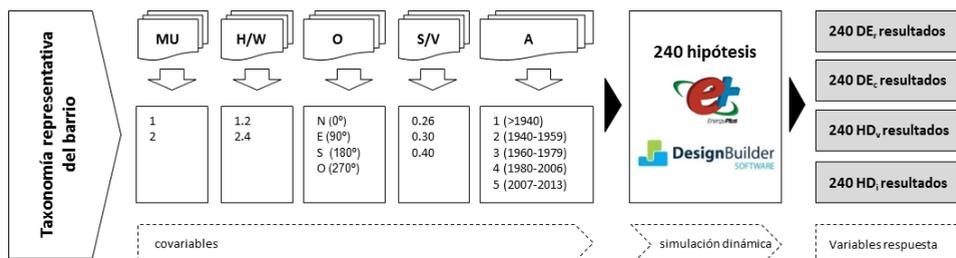


Figura 5.25 Configuración de las 240 hipótesis para determinar las cuatro variables respuesta

Las covariables de las 240 hipótesis obtenidas se describen en la tabla AII.1 del Anexo II Hipótesis de Cálculo³.

La configuración de las 240 hipótesis en el programa de simulación no es tarea sencilla, pues deben configurarse una a una teniendo en cuenta numerosos parámetros. Por un lado, se define la disposición urbana del edificio en el contexto de la manzana y el ancho de calle, con lo que quedan definidas las covariables MU, H/W y O. Estas combinaciones deben simularse para cada una de las tres clases edificatorias, definidas por la covariable S/V. Y, finalmente, deben incorporarse los cinco periodos temporales (covariable A), lo que implica configurar el paquete de las soluciones constructivas del edificio de cada periodo, en todas las hipótesis.

La Figura 5.26 muestra un ejemplo de la configuración urbana que adoptan las hipótesis 81, 82, 83 y 84, definidas por la tipología de manzana MU₁, un ancho de calle de 10 m (H/W_{2,4}), las cuatro orientaciones (H81 a N, H82 a S, H83 a E y H84 a O), para la tipología edificatoria 1P_{FM(≤4)} en el periodo temporal 1 [anterior a 1940]. Como se observa en dicha figura, se considera en el cálculo el contexto urbano de las manzanas colindantes, que previsiblemente tendrán influencia en el comportamiento energético de los edificios, al modificar las condiciones de soleamiento y sombras.

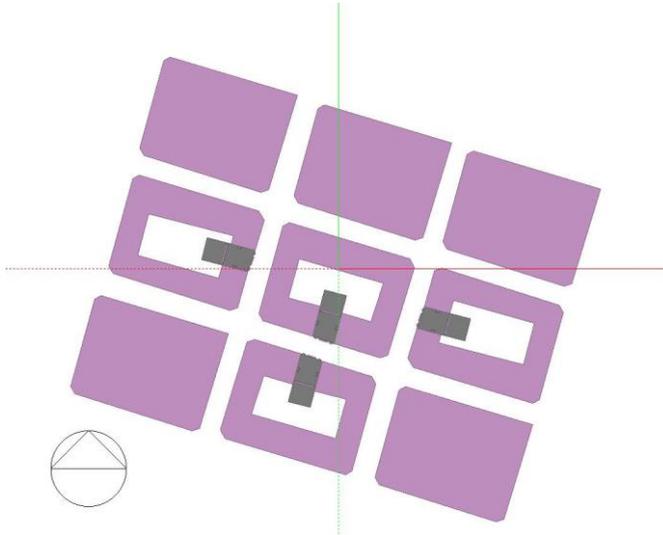


Figura 5.26 Ejemplo de configuración de la H81, H82, H83 y H84 en DesignBuilder

La Figura 5.27 muestra otros cuatro ejemplos, las H229, H230, H231 y H232, que corresponden a la tipología de manzana MU₂, ancho de calle de 20 m (H/W_{1,2}), las cuatro orientaciones (H229 a N, H230 a S, H231 a E y H232 a O), para la tipología edificatoria PF_{M(>4)} en el periodo temporal 5 [2007-2013].

³ El Anexo II Hipótesis de Cálculo expone los valores que asumen las covariables en cada una de las 240 hipótesis de cálculo planteadas, para ser simuladas con la herramienta DesignBuilder.

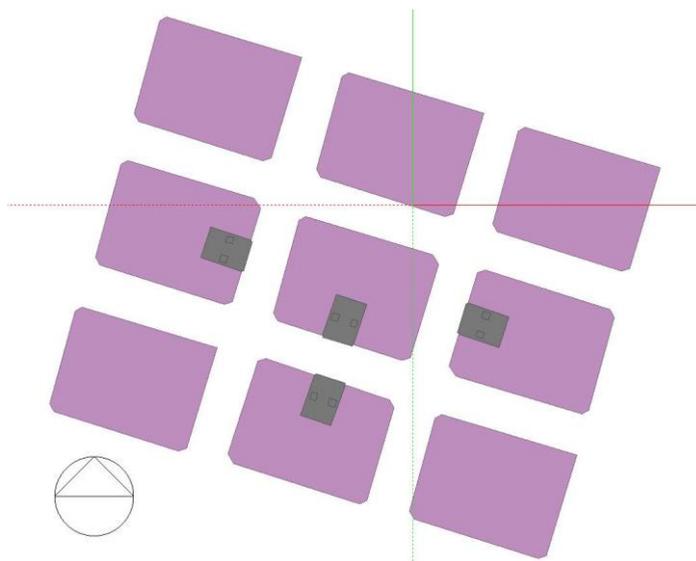


Figura 5.27 Ejemplo de configuración de la H229, H230, H231 y H232 en DesignBuilder

Este mismo procedimiento se sigue en el resto hipótesis, hasta configurar la totalidad de las 240. Cabe indicar que el paquete de soluciones constructivas que definen cada uno de los cinco periodos se configuran internamente en el programa por medio de cinco plantillas diferentes que incluyen las soluciones de fachada, medianera, cubierta, suelo, partición interior, huecos y puentes térmicos, descritas anteriormente en la Tabla 5.12 y la Tabla 5.13.

5.4.3 II.3 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CÁLCULO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS VARIABLES RESPUESTA

Como solicitaciones exteriores se establece el clima definido para la localidad de Castellón de la Plana, que se corresponde con una zona climática B3, según el Código Técnico de la Edificación (CTE). Los valores de temperatura y radiación solar se introducen en el *software* DesignBuilder en forma de plantilla climática, proporcionada por la empresa distribuidora del *software* (Aurea Consulting, 2015), que ha elaborado unas plantillas ajustadas a las exigencias de todas las zonas climáticas del territorio español, según los parámetros oficiales establecidos por el CTE.

En cuanto a las solicitaciones interiores, tal y como se establece en el apartado 4.6.3 del Capítulo 4, los parámetros de cálculo deben ser los mismos en todas las hipótesis, previamente a lanzar las simulaciones. Dichos parámetros se presentan en la Tabla 5.15. El patrón de ocupación adoptado corresponde con los perfiles de uso establecidos por el CTE, en su actualización de 2013 (CTE, 2013), al igual que los valores de cargas operacionales para edificios de uso residencial.

Por otro lado, acorde a los resultados obtenidos, se considera que el periodo con necesidades de calefacción opera desde el 1 de octubre al 31 de mayo, y el periodo con necesidades de refrigeración opera desde el 1 de junio al 30 de septiembre.

Tabla 5.15 Parámetros de cálculo considerados en DesignBuilder

Parámetro	Unidad	Valor
Ocupación		
Densidad	persona/m ²	0,03
Patrón horario		Día laboral: 7:00-15:00 [25%]; 15:00-23:00 [50%]; 23:00-7:00 [100%] Fines de semana: 0:00 -24:00 [100%]
Tasa metabólica	W/persona	117,2
Vestimenta en invierno/verano	clo	1/0,5
Temperaturas de consigna		
Calefacción	°C	20
Refrigeración	°C	25
Ventilación natural	°C	24
Ganancias internas		
Cargas internas	W/m ²	8,8
Iluminación	W/m ² – 100 lux	4,4
Ganancias misceláneas	W/m ²	4,4
Ganancias solares		
Incluye todos los edificios en el cálculo del sombreado Modela reflexiones (también sombreado sobre el terreno)		
Demanda de ACS		
Demanda ACS	l/m ² día	0,84
Infiltración		
Tasa de renovaciones/hora	h ⁻¹	0,82
Tasa de caudal de aire	l/s por persona	10

Las simulaciones dinámicas se realizan de forma horaria, de manera que los resultados pueden ser obtenidos para cada hora de todos los días de un año tipo. El número de etapas para realizar cada simulación es de 10 etapas por hora.

5.5 ETAPA III: MODELIZACIÓN ESTADÍSTICA

En esta etapa, los resultados obtenidos de la evaluación energética son tratados estadísticamente para obtener las cuatro ecuaciones de predicción de los cuatro indicadores energéticos que permitirán evaluar el comportamiento pasivo del parque edificatorio residencial del barrio, DE_r , DE_c , HD_v , HD_i . Se diferencian cuatro sub-etapas, que se describen en los siguientes apartados.

5.5.1 III.1 ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LOS DATOS

Los datos obtenidos de las simulaciones determinan el punto de partida de este apartado. En primer lugar, los datos son analizados estadísticamente de forma numérica y gráfica, como se muestra en la Tabla 5.16 y la Figura 5.28. Como se observa, los datos presentan fuerte variabilidad. En el caso de DE_r , los valores reales son negativos porque se requiere extraer energía del interior del edificio, mientras que en el caso de DE_c , los valores son positivos porque se requiere un aporte energético. Para realizar la modelización estadística, los valores originales negativos de la variable DE_r han sido multiplicados por (-1). El resto de variables, DE_c , HD_v y HD_i adoptan valores positivos, y no han requerido de una transformación.

Tabla 5.16 Descripción de las variables respuesta DE_r , DE_c , HD_v y HD_i

Variable	Mínimo	1 ^{er} cuartil	Mediana	Media	3 ^{er} cuartil	Máximo
DE_r	0,0234	0,653	1,333	1,660	2,457	5,580
DE_c	22,19	64,46	96,54	96,50	122,70	211,90
HD_v	117,60	438,70	637,40	722,60	1029,00	1597,00
HD_i	3830,00	4735,00	4911,00	4859,00	5049,00	5303,00

La Figura 5.28 ilustra el histograma y el diagrama de cajas y bigotes para las cuatro variables respuesta (o indicadores). En dicha figura se observa la forma de cada distribución, respondiendo la variable DE_r a una distribución de tipo Gamma, por tener altas frecuencias en los valores más pequeños y disminuir con valores más altos, y las demás variables (DE_c , HD_v y HD_i), a una distribución Gaussiana.

La Figura 5.29, muestra los mismos datos desglosados en las dos tipologías de manzana urbana (MU_1 y MU_2). Se puede observar que las distribuciones siguen siendo las mismas que anteriormente. Ello denota la coherencia en el hecho de modelar los datos todos en conjunto ($MU_1 + MU_2$) y por separado en MU_1 y MU_2 .

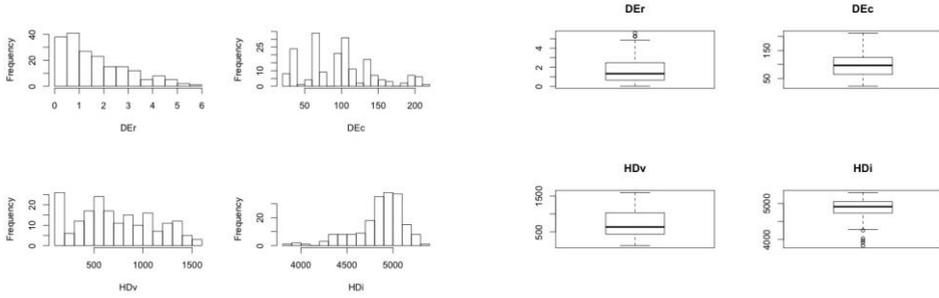


Figura 5.28 Histograma (izquierda) y diagrama de cajas y bigotes (derecha) de las variables respuesta

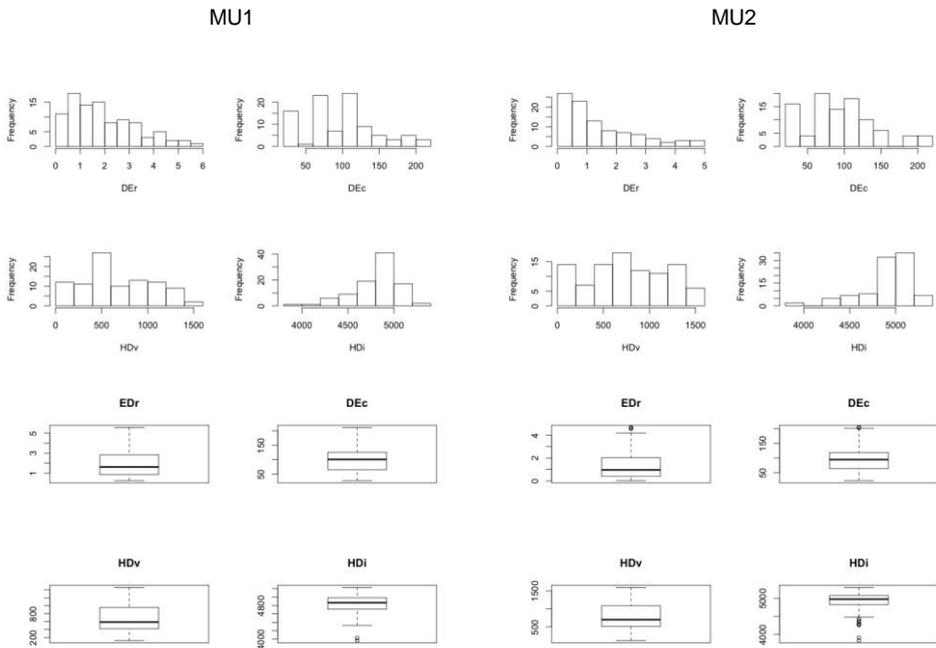


Figura 5.29 Histograma (arriba) y diagrama de cajas y bigotes (abajo) de las variables respuesta para MU₁ (izquierda) y MU₂ (derecha)

5.5.2 III.2 CONFIGURACIÓN DE LOS MODELOS

El tratamiento de los datos, como se apunta en el Capítulo 4, ha sido ejecutado mediante el *software* libre *R statistical package* (versión 3.1) (R Development Core Team, 2011) y el *R-INLA package* (INLA, 2016). Combinando las variables y covariables, se obtiene la batería de modelos que se organiza como sigue. Por un lado, se considera la manzana urbana (covariable MU) fuera del

modelo, con el objetivo de poder comparar los resultados obtenidos para cada una de las dos manzanas identificadas. Ello da lugar a una primera batería de 32 modelos donde se combinan las 4 variables respuesta con las covariables H/W, A, O y S/V, de forma separada. A continuación, se conforma una segunda batería de 8 modelos, teniendo en cuenta las cuatro covariables anteriores de forma conjunta. Por otro lado, MU se integra como una covariable más, por lo se obtiene una tercera batería formada por 20 modelos. Por último, las cinco covariables (H/W, A, O, S/V y MU) se analizan de forma conjunta, obteniendo una cuarta batería compuesta por 4 modelos. Se originan pues un total de 64 modelos. El primer conjunto de cuatro tablas (Tabla 5.17, Tabla 5.18, Tabla 5.19 y Tabla 5.20) muestran los valores de DIC para las cuatro baterías de modelos. El segundo conjunto de tablas (Tabla 5.21, Tabla 5.22, Tabla 5.23 y Tabla 5.24) muestran los valores de CPO.

Tabla 5.17 DIC para la primera batería de 32 modelos considerando las covariables H/W, A, O y S/V por separado, comparando MU₁ y MU₂

		H/W	A	O	S/V
DE _r	MU1	289,88	253,31	296,38	240,38
DE _c		1035,85	1059,57	1045,48	1020,27
HD _v		524,74	396,55	526,40	512,92
HD _i		445,38	404,37	447,70	431,22
DE _r	MU2	247,17	203,51	251,64	224,21
DE _c		1029,79	1047,36	1040,28	1014,11
HD _v		547,11	442,83	548,57	532,85
HD _i		-411,06	-446,00	-408,79	-419,93

Tabla 5.18 DIC para la segunda batería de 8 modelos considerando las covariables H/W, A, O y S/V de forma conjunta, comparando MU₁ y MU₂

		H/W; A; O; S/V
DE _r	MU1	126,08
DE _c		996,10
HD _v		381,15
HD _i		384,18
DE _r	MU2	151,56
DE _c		983,74
HD _v		425,85
HD _i		430,52

Tabla 5.19 DIC para la tercera batería de 24 modelos considerando todas las covariables (H/W, A, O, S/V y MU) por separado

	H/W	A	O	S/V	MU
DE _r	550,98	483,59	560,92	490,49	558,99
DE _c	2050,29	1971,48	2049,33	2026,12	2057,42
HD _v	1070,93	849,77	1073,99	1045,44	1071,33
HD _i	920,70	848,46	927,74	899,20	922,71

Tabla 5.20 DIC para la cuarta batería de 4 modelos considerando todas las covariables (H/W, A, O, S/V y MU) de forma conjunta

H/W; A; O; S/V; MU	
DE _r	319,82
DE _c	1942,99
HD _v	804,58
HD _i	815,43

Tabla 5.21 CPO para la primera batería de 32 modelos considerando las covariables H/W, A, O y S/V por separado, comparando MU₁ y MU₂

		H/W	A	O	S/V
DE _r	MU1	1,541498	1,319262	1,508144	1,250554
DE _c		5,394913	5,520670	5,445634	5,313597
HD _v		2,731860	2,063948	2,740482	2,670111
HD _i		2,321519	2,109037	2,333540	2,247051
DE _r	MU2	1,309396	1,060710	1,286546	1,165767
DE _c		5,364257	5,457064	5,419085	5,282162
HD _v		2,848420	2,304734	2,856211	2,773782
HD _i		2,470266	2,289598	2,480160	2,422938

Tabla 5.22 CPO para la segunda batería de 8 modelos considerando las covariables H/W, A, O y S/V de forma conjunta, comparando MU₁ y MU₂

H/W; A; O; S/V		
DE _r	MU1	0,658676
DE _c		5,187748
HD _v		1,985435
HD _i		2,002094
DE _r	MU2	0,788749
DE _c		5,124821
HD _v		2,218651
HD _i		2,244737

Tabla 5.23 CPO para la tercera batería de 24 modelos considerando todas las covariables (H/W, A, O, S/V y MU) por separado

	H/W	A	O	S/V	MU
DE _r	1,434107	1,259472	1,459823	1,276742	1,455178
DE _c	5,339549	5,135604	5,337008	5,276180	5,358084
HD _v	2,788211	2,212131	2,796270	2,721721	2,789244
HD _i	2,398959	2,211349	2,417017	2,342444	2,404779

Tabla 5.24 CPO para la cuarta batería de 4 modelos considerando todas las covariables (H/W, A, O, S/V y MU) de forma conjunta

H/W; A; O; S/V; MU	
DE _r	0,833192
DE _c	5,059606
HD _v	2,095318
HD _i	2,124434

5.5.3 III.3 SELECCIÓN DE MODELOS CON MEJOR AJUSTE

De los resultados obtenidos, se puede deducir que en todos los casos la inclusión de un número mayor de covariables mejora los modelos, ya que los DIC y CPO obtenidos son menores en aquellos modelos que incluyen las cinco covariables. Por tanto, el hecho de incluir la manzana urbana MU como una covariable más, mejora el modelo, pues conlleva un menor error asociado, tal y como se explicó en el apartado 4.7.3 del Capítulo 4. Por ejemplo, cuando analizamos los valores de DIC para los primeros cuatro modelos de DE_r que relacionan MU_1 con cada una de las covariables de forma separada (primera fila de la Tabla 5.17), observamos que el mejor modelo es $DE_{r(MU_1 \leftrightarrow S/V)}$. Sin embargo, cuando el modelo para DE_r incluye la MU como covariable ($DE_{r(MU_1 \leftrightarrow H/W-A-O-S/V)}$ (primera fila en Tabla 5.18), el DIC es incluso menor, lo que indica que es un mejor modelo. Lo mismo ocurre con el CPO de estos mismos ejemplos de modelos, es menor en el modelo que incluye todas las covariables. Este hecho se repite en el resto de modelos.

Por otro lado, si comparamos aquellos modelos que integran MU como covariable, observamos el mismo comportamiento. El modelo para $DE_{r(H/W-A-O-S/V-MU)}$ en la cuarta batería (primera fila de la Tabla 5.20) es mejor que los modelos que integran las covariables por separado (primera fila de la Tabla 5.19), es decir $DE_{r(H/W)}$, $DE_r(A)$, $DE_r(O)$, $DE_r(S/V)$, $DE_r(MU)$.

Por último, se determina el coeficiente de correlación entre los valores observados y los valores predichos y el error asociado RMSE para todos los modelos. Los resultados se muestran en la Tabla 5.25, Tabla 5.26, Tabla 5.27 y Tabla 5.28.

Tabla 5.25 Correlación y RMSE para la primera batería de 32 modelos

		H/W	A	O	S/V
DE_r	MU1	0,3272/1,2473	0,5828/1,0727	0,2069/1,2893	0,6624/0,9872
DE_c		0,04242/52,3090	-0,7130/59,2891	0,03917/54,8400	0,1555/48,3402
HD_v		0,1321/3,6207	0,8611/1,8569	0,02381/3,6517	0,3611/3,4065
HD_i		0,2088/2,3945	0,6129/1,9341	0,1388/2,4237	0,4184/2,2249
DE_r	MU2	0,2956/1,1434	0,5539/1,0097	0,1532/1,1867	0,6006/0,9662
DE_c		0,0436/50,6284	-0,7411/55,6610	-0,0159/53,3735	0,1809/46,8202
HD_v		0,1335/4,0682	0,8177/2,3630	0,0546/4,0989	0,3905/3,7796
HD_i		0,1807/2,7722	0,5719/2,3111	0,0981/2,8032	0,3433/2,6493

Tabla 5.26 Correlación y RMSE para la segunda batería de 8 modelos

		H/W; A; O; S/V
DE_r	MU1	0,9077/0,5673
DE_c		0,5210/41,5530
HD_v		0,8906/1,6608
HD_i		0,7242/1,6874
DE_r	MU2	0,8303/0,6799
DE_c		0,5689/38,9334
HD_v		0,8597/2,0965
HD_i		0,6465/2,1484

Tabla 5.27 Correlación y RMSE para la tercera batería de 20 modelos

	H/W	A	O	S/V	MU
DE _r	0,3038/1,2305	0,5562/1,0776	0,1795/1,2712	0,6168/1,0187	0,2239/1,2587
DE _c	0,0429/49,8644	0,7257/40,6334	0,0119/49,6547	0,1678/46,9283	-0,0557/50,799
HD _v	0,1316/3,8814	0,8303/2,1820	0,0397/3,9124	0,3731/3,6327	0,1236/3,8854
HD _i	0,1907/2,6246	0,8303/2,1745	0,0119/2,6732	0,3723/2,4819	0,16197/2,6384

Tabla 5.28 Correlación y RMSE para la cuarta batería de 4 modelos

	H/W; A; O; S/V; MU
DE _r	0,8815/0,6336
DE _c	0,6266/37,0674
HD _v	0,8744/1,8996
HD _i	0,6824/1,9539

Al observar la primera batería de 32 modelos en la Tabla 5.25, se puede deducir que los modelos que mejor predicen los valores de las variables respuesta son aquellos que incluyen las covariables A y S/V, debido a que poseen unos coeficientes de correlación mayores. Sin embargo, también se puede observar que la segunda batería de modelos tienen claramente las correlaciones más altas, pues incluyen las cuatro covariables conjuntamente, para cada tipo de MU. Por ello, éstos presentan un menor RMSE asociado entre los valores predichos y los observados.

De la Tabla 5.27 y la Tabla 5.28, donde MU se considera como una covariable más, se puede extraer una conclusión similar. Los modelos que incluyen las cinco covariables conjuntamente presentan mejor ajuste que los modelos que las consideran por separado.

Finalmente, comparando los dos conjuntos de modelos mejor ajustados (segundo y cuarto), se puede concluir que el mejor es el cuarto, es decir, el que incluye todas las covariables conjuntamente, ya que presenta los coeficientes de correlación más altos y los menores RMSE asociados.

La Figura 5.30 muestra gráficamente la correlación entre los valores observados y los predichos para los cuatro modelos seleccionados, los cuales incluyen todas las covariables. Los resultados mostrados revelan que el modelo que mejor se ajusta es $HD_{r(H/W-A-O-S/V-MU)}$, con un coeficiente de correlación de 0,87, seguido por $DE_{r(H/W-A-O-S/V-MU)}$ con 0,86, $HD_{i(H/W-A-O-S/V-MU)}$ con 0,68 y finalmente $DE_{c(H/W-A-O-S/V-MU)}$ con 0,63.

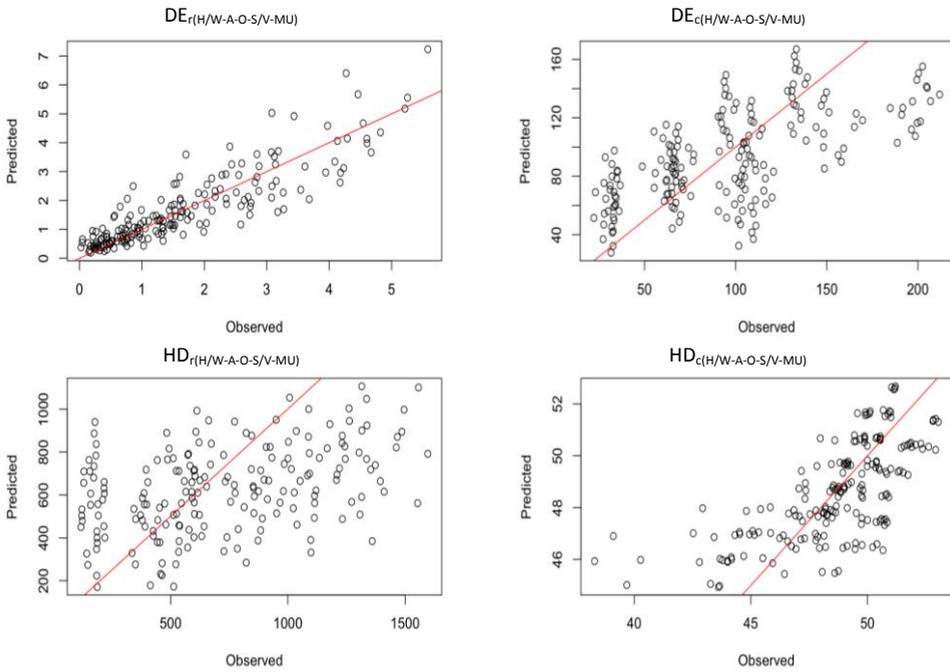


Figura 5.30 Coeficiente de correlación ente los valores observados y los predichos de los modelos seleccionados

De acuerdo a las conclusiones obtenidas en la comparación de modelos, los últimos cuatro modelos (cuarto conjunto) han sido seleccionados como los modelos con mejor ajuste por presentar los coeficientes de correlación más altos con los menores RMSE asociados. Siguiendo la expresión:

$$\eta_a(s_i) = \beta_0 + \sum_i \beta_i X_i$$

los cuatro modelos han sido configurados incluyendo los coeficientes que determinan el efecto de cada covariable, los cuales se muestran en la Tabla 5.32 del apartado 5.5.4. Los mismos se presentan a través de los cuatro algoritmos siguientes:

$$DE_r = 2,6480 + (0,3336 \cdot A) + (-6,5815 \cdot S/V) + (0,0013 \cdot O) + (-0,4637 \cdot H/W) + (-0,4372 \cdot MU)$$

$$DE_c = 46,8932 + (-17,6330 \cdot A) + (118,4408 \cdot S/V) + (-0,0505 \cdot O) + (19,8277 \cdot H/W) + (14,5047 \cdot MU)$$

$$HD_r = 6,9152 + (-2,1639 \cdot A) + (13,6464 \cdot S/V) + (-0,0015 \cdot O) + (0,8659 \cdot H/W) + (0,9760 \cdot MU)$$

$$HD_c = 44,5077 + (-0,9679 \cdot A) + (12,5778 \cdot S/V) + (-0,004 \cdot O) + (0,8951 \cdot H/W) + (0,9202 \cdot MU)$$

Obtenidas las cuatro ecuaciones de predicción, variando los valores de las covariables según los condicionantes urbanos y edificatorios, es posible predecir la demanda energética para calefacción y refrigeración y las horas de desconfort anuales para verano e invierno, para cada edificio que integra el barrio objeto de estudio. En el caso de la ecuación para la variable DE_r , al tratarse de una distribución de familiar Gamma como se desprende de Figura 5.28, debe aplicarse la función

exponencial del resultado obtenido de la ecuación (Blangiardo y Camaletti, 2015). La agregación de dichos resultados dará lugar al diagnóstico del comportamiento energético pasivo del barrio en su conjunto.

5.5.4 III.4 IDENTIFICACIÓN DE COVARIABLES SIGNIFICATIVAS

En este apartado se analiza la influencia de cada covariable sobre las variables respuesta, a través de los efectos fijos de todos los modelos (denotados por β_i). Éstos están presentados de la Tabla 5.29, la Tabla 5.30, la Tabla 5.31 y la Tabla 5.32.

Tabla 5.29 Efectos fijos: β_i (media [percentil 2,5; percentil 97,5]). Primer conjunto de 32 modelos

		H/W	A	O	S/V
DE _r	MU1	-0,3745 [-0,5955; -0,1538]	0,3238 [0,2428; 0,4041]	0,0014 [0,0000; 0,0028]	-8,2477 [-10,0081; -6,4818]
DE _v		36,8255 [26,7441; 47,0489]	7,5230 [1,5431; 14,0321]	0,2333 [0,1391; 0,3322]	139,2179 [95,5385; 182,7811]
HD _v		0,8402 [-0,3677; 2,0482]	-2,2046 [-2,4676; -1,9416]	-0,0007 [-0,0080; 0,0066]	21,3303 [10,2201; 32,4048]
HD _i		0,9917 [0,1900; 1,7977]	-1,0224 [1,2959; -0,7478]	0,0038 [-0,0011; 0,0086]	18,8925 [11,5351; 26,3047]
DE _r	MU2	-0,4397 [-0,7328; -0,1469]	0,4700 [0,3601; 0,5777]	0,0020 [0,0000; 0,0040]	-7,8284 [-10,3440; -5,3079]
DE _v		34,2280 [24,3390; 44,2917]	5,2809 [-0,5471; 11,4892]	0,1986 [0,1060; 0,2956]	134,4105 [90,9687; 177,7394]
HD _v		0,9653 [-0,3888; 2,3199]	-2,3467 [-2,6810; -2,0123]	-0,0020 [-0,0102; 0,0062]	25,6614 [13,4154; 37,8582]
HD _i		0,0085 [-0,0008; 0,0178]	-0,0113 [-0,0146; -0,0081]	0,0000 [-0,0001; 0,0000]	0,1620 [0,0726; 0,2512]

Tabla 5.30 Efectos fijos: β_i (media [percentil 2,5; percentil 97,5]). Segundo conjunto de 8 modelos

		H/W; A; O; S/V
DE _r	MU1	-0,4137 [-0,5125; -0,3149]; 0,2725 [0,2297; 0,3152]; 0,0009 [0,0003; 0,0015]; -7,2562 [-8,2794; -6,2303]
DE _v		31,6630 [20,1911; 43,5282]; -13,3457 [-18,5742; -7,9547]; 0,0984 [0,0177; 0,1805]; 100,4968 [48,2215; 152,0663]
HD _v		0,8170 [0,2512; 1,3828]; -2,1055 [-2,3496; -1,8613]; -0,0008 [-0,0042; 0,0025]; 11,6464 [5,8796; 17,4134]
HD _i		0,9203 [0,3459; 1,4967]; -0,9111 [-1,1589; -0,6623]; 0,0036 [0,0017; 0,0036]; 13,7288 [7,8825; 19,6182]
DE _r	MU2	-0,5189 [-0,7086; -0,3293]; 0,4091 [0,3210; 0,4969]; 0,0020 [0,0007; 0,0032]; -5,7667 [-7,6639; -3,8597]
DE _v		30,0743 [19,1843; 41,4377]; -14,2590 [-19,1722; -9,1602]; 0,0673 [-0,0081; 0,1445]; 108,4249 [56,8547; 159,093]
HD _v		0,9335 [0,2202; 1,6469]; -2,2142 [-2,5219; -1,9065]; -0,0022 [-0,0064; 0,0021]; 15,8751 [8,6411; 23,1090]
HD _i		0,9645 [0,2336; 1,6991]; -0,9780 [-1,2932; -0,6609]; -0,0024 [-0,0068; 0,0019]; 13,2601 [5,8608; 20,7335]

Tabla 5.31 Efectos fijos: β_i (media [percentil 2,5; percentil 97,5]). Tercer conjunto de 20 modelos

		H/W	A	O	S/V	MU
DE _r		-0,401 [-0,589; -0,213]	0,377 [0,306; 0,448]	0,002 [0,0004; -0,003]	-8,071 [-9,681; -6,458]	-0,352 [-0,581; -0,123]
DE _v		28,331 [19,99; 36,818]	-8,486 [-12,444; -4,231]	0,1255 [0,0608; 0,192]	142,972 [102,013; 183,88]	29,941 [19,739; 40,31]
HD _v		0,8813 [-0,0345; 1,797]	-2,2811 [-2,4992; -2,063]	-0,0015 [-0,0070; 0,004]	23,964 [15,4843; 32,4275]	0,9949 [-0,1055; 2,095]
HD _i		0,9344 [0,3143; 1,555]	-1,0732 [-1,2904; -0,856]	0,0006 [-0,0032; 0,0043]	17,7913 [11,9501; 23,6473]	0,9690 [0,2207; 1,7185]

Tabla 5.32 Efectos fijos: β_i (media [percentil 2,5; percentil 97,5]). Cuarto conjunto de 4 modelos

		H/W; A; O; S/V; MU
DE _r		-0,4637 [-0,5733; -0,3542]; 0,3336 [0,2846; 0,3824]; 0,0013 [0,0007; 0,0020]; -6,5815 [-7,6931; -5,4668]; -0,4372 [-0,5687; -0,3059]
DE _v		19,8277 [11,8708; 27,9586]; -17,6330 [-21,0943; -14,1163]; 0,0505 [-0,0009; 0,1025]; 118,4408 [73,1675; 163,3233]; 14,5047 [4,9883; 24,228]
HD _v		0,8659 [0,4116; 1,3199]; -2,1639 [-2,3599; -1,9679]; -0,0015 [-0,0042; 0,0012]; 13,6464 [9,0016; 18,2881]; 0,9760 [0,4309; 1,5207]
HD _i		0,8951 [0,4291; 1,3616]; -0,9679 [-1,1690; -0,7665]; 0,0004 [-0,0023; 0,0032]; 12,5778 [7,8164; 17,3513]; 0,9202 [0,3610; 1,4800]

Aquellas variables que son significativas tienen la media, el percentil 2,5% y el 97,5% sin cambio de signo. El signo positivo implica que la variable respuesta aumenta cuando aumenta la covariable. El signo negativo implica que la variable respuesta disminuye cuando también lo hace la covariable.

Si analizamos detenidamente los efectos fijos, observamos que todas las covariables son representativas en algún momento. La más significativa es el factor de forma (S/V), seguida del año

de construcción (A) y la proporción de calle (H/W), ambas significativas de forma similar. La cuarta variable más significativa es la manzana urbana (MU) y finalmente la orientación (O).

En relación al factor de forma, valores más altos de S/V implican edificios menos compactos y conducen a transferencias de calor más altas entre el ambiente interior del edificio y el exterior, en el caso de DE_c . Podemos observar que a medida que S/V aumenta, las variables respuesta HD_v y HD_i también aumentan, lo que significa que los edificios con mayores coeficientes de forma (menos compactos) comportan un peor confort térmico en su interior.

Con respecto a A, se observa que las horas de desconfort anuales para verano e invierno disminuyen a medida que el año de construcción es más reciente. Ello está en concordancia con el hecho de que las soluciones constructivas de la envolvente térmica mejoran con el paso del tiempo. Los edificios más recientes incluyen materiales de aislamiento térmico en su envolvente, confiriendo mejores prestaciones a las fachadas, las cubiertas, los suelos y los huecos, lo que conduce a una menor demanda energética de calefacción que los edificios más antiguos. Con respecto a la demanda de calefacción (DE_c), esta también disminuye a con soluciones constructivas más recientes. Sin embargo, la demanda de refrigeración (DE_r) aumenta frente a este hecho, que será analizado con mayor profundidad en el Capítulo 6.

En relación a la ratio H/W de calle, se puede observar que a medida que H/W aumenta, las variables respuesta DE_c , HD_v y HD_i también aumentan. Para DE_c , ello supone que valores altos de H/W conducen a una mayor demanda energética de calefacción, explicada por la escasa posibilidad de acceso solar (altos ratios de H/W) que impide las ganancias térmicas naturales por soleamiento. En el caso de DE_r , altos ratios de H/W conducen a menor demanda energética de refrigeración (valores próximos a 0), también debido al escaso acceso solar (especialmente durante la temporada de verano) que, en este caso, tiene un efecto favorable.

La manzana urbana (MU) también está íntimamente relacionada con el acceso solar en los edificios. MU_1 ofrece la posibilidad de grandes ganancias solares en las fachadas interiores de los edificios, ya que recaen a un gran patio de manzana; mientras que MU_2 , al disponer de pequeños patios de luces propios de los edificios, no ofrece dicha posibilidad. Por ello, los edificios emplazados en la MU_2 demandan menor cantidad de energía durante el verano (DE_r).

La covariable orientación (O), se muestra únicamente significativa en el caso de DE_r , pero con valores muy próximos a 0, lo que indica un bajo nivel de significancia. A pesar de que la orientación no parece, a priori demasiado significativa, se observa que los modelos en los que se incluye tienen un menor RMSE asociado, por lo que se concluye que, incluir el efecto de la orientación, mejora el modelo. Sin embargo, la orientación es un aspecto más complejo, pues ambas tipologías de MU ofrecen diferentes condicionantes, por lo que requiere de un estudio más pormenorizado que ayude a determinar su efecto sobre las variables respuesta de forma más detallada. El Capítulo 6 aborda con mayor profundidad este aspecto.

Estas y otras consideraciones se discuten de forma más exhaustiva en el Capítulo 6.

5.6 ETAPA IV: EXTRAPOLACIÓN DEL DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO A ESCALA URBANA

En esta cuarta y última etapa, se determina el diagnóstico energético de los edificios que constituyen el barrio objeto de estudio para extrapolar conclusiones a una escala urbana. Cada una de las cuatro ecuaciones de predicción de los indicadores de evaluación energética, DE_r , DE_c , HD_v y HD_i , son aplicadas a los edificios contenidos en el área urbana, individualmente.

La tecnología SIG permite tratar el gran volumen de información generado y realizar los cálculos de los cuatro indicadores. Para ello, las covariables de cada edificio individual han sido determinadas e integradas en la base de datos SIG, a través de una tabla de atributos georreferenciada en base a la referencia catastral. Como resultado de aplicar las ecuaciones de predicción, se obtienen los valores de las cuatro variables respuesta para cada edificio individual que compone el barrio. Posteriormente, los resultados de esta evaluación individual son agregados para determinar la demanda energética y las horas de discomfort de la totalidad del barrio.

Siguiendo el procedimiento establecido en la Figura 4.11 del Capítulo 4, que define tres fases diferenciadas, se desarrolla a continuación la Etapa IV, siguiendo un enfoque *bottom-up*.

5.6.1 IV.1 CÁLCULO DE LOS INDICADORES ENERGÉTICOS EN CADA EDIFICIO

A modo de ejemplo, la Tabla 5.33 muestra el procedimiento seguido para el cálculo de cada uno de los indicadores, como resultado de aplicar las cuatro ecuaciones de predicción obtenidas de la modelización estadística.

Tabla 5.33 Cálculo de los cuatro indicadores energéticos para cada edificio

Ref. catastral	Sup. Construida (m ²)	Tipo (Catastral)	Año	Planta (nº)	H/W (ratio)	A	O (°)	S/N (m ⁻¹)	MU	DE ₁ /m ² (kWh/m ² año)	DE ₂ (kWh/m ² año)	DE ₃ /m ² (kWh/m ² año)	DE _c (kWh/año)	HD _v (h/año)	HD _i (h/año)
2200612YK5320S	256	112	2007	3	2,4	5	270	0,3	2	2,02	518,24	84,49	21.629,77	381,47	4.753,81
2499801YK5229N	208	112	1970	3	2,4	3	270	0,3	1	1,61	334,56	105,25	21.892,54	716,65	4.855,37
2300126YK5320S	223	112	1950	2	2,4	2	180	0,3	2	0,66	147,62	132,84	29.624,50	1.044,14	5.040,58
2302506YK5320S	250	112	1960	3	1,2	3	0	0,3	2	1,28	318,93	82,32	20.582,27	750,85	4.829,18
2302509YK5320S	129	112	1983	3	1,2	4	0	0,3	2	1,78	229,73	64,69	8345,79	534,46	4732,39
2501113YK5320S	417	112	1991	4	1,6	4	0	0,3	2	1,48	616,91	72,62	30285,52	569,09	4768,20
...
Total barrio	313.301,00										523.530,78 MWh/año		29.354,89 MWh/año		

La demanda energética a nivel global del barrio se estima en 523,53 MWh/año para la demanda de refrigeración y en 29.354,89 MWh/año para la demanda de calefacción. Como se observa, la demanda de calefacción representa un mayor reto a la hora de prever una intervención de rehabilitación energética en el barrio, pues es donde se encuentra el mayor potencial de ahorro energético del parque residencial.

5.6.2 IV.2 DESARROLLO DE UNA ESCALA DE VALORACIÓN PARA LOS INDICADORES ENERGÉTICOS

Con el objetivo de presentar los resultados en un mapa SIG, se plantea previamente una escala de valoración para los indicadores. Concretamente, se establecen tres escalas de valoración, siendo estas:

- demanda energética de refrigeración, DE_r
- demanda energética de calefacción, DE_c
- horas anuales de discomfort, HD

La clasificación propuesta en este trabajo se basa en la clasificación energética de indicadores para los edificios existentes utilizada en España. La escala se establece desde el indicador A al G. Debido a que los valores para DE_r están concentrados en el indicador A y los valores de DE_c en el G, en el marco de este trabajo se propone una clasificación extendida. En esta, se desglosan los indicadores A y G en cuatro indicadores adicionales, respectivamente (A1, A2, A3, A4, G1, G2, G3 y G4), con el objetivo de clasificar más pormenorizadamente la demanda energética de los edificios del barrio. Esta clasificación se muestra en la Tabla 5.34. En el caso de las horas de discomfort anuales no existe ninguna clasificación oficial para este indicador, por lo que se ha propuesto una clasificación en el marco de este trabajo, de la clase A a la F, en rangos de 1.000 horas/año, como se muestra en la Tabla 5.35.

Tabla 5.34 Escala de valoración para el indicador energético DE basado en la clasificación propuesta por la legislación española para edificios existentes (kWh/m²año)

Indicador energético	DE_r [kWh/m ² año]	DE_c [kWh/m ² año]
A1*	$DE_r < 0,7$	$DE_c < 4,7$
A2*	$0,7 \leq DE_r < 1,5$	
A3*	$1,5 \leq DE_r < 3$	
A4*	$3 \leq DE_r < 4,7$	
B	$4,7 \leq DE_r < 7,6$	$4,7 \leq DE_c < 10,9$
C	$7,6 \leq DE_r < 11,7$	$10,9 \leq DE_c < 19,6$
D	$11,7 \leq DE_r < 18$	$19,6 \leq DE_c < 32,8$
E	$18 \leq DE_r < 22,3$	$32,8 \leq DE_c < 64,5$
F	$22,3 \leq DE_r < 27,4$	$64,5 \leq DE_c < 70,3$
G1*	$27,4 \leq DE_r$	$70,3 \leq DE_c < 102,3$
G2*		$102,3 \leq DE_c < 134,3$
G3*		$134,3 \leq DE_c < 166,9$
G4*		$166,9 \leq DE_c$

*La clasificación española considera del indicador A al G. A1, A2, A3, A4, G1, G2, G3 y G4 se proponen en el contexto de este trabajo.

Tabla 5.35 Escala de valoración para el indicador energético HD (horas/año)

Indicador HD	HD [h/año]
A	$HD < 1.000$
B	$1.000 \leq HD < 2.000$
C	$2.000 \leq HD < 3.000$
D	$3.000 \leq HD < 4.000$
E	$4.000 \leq HD < 5.000$
F	$5.000 \leq HD$

5.6.3 IV.3 DESARROLLO DE MAPAS URBANOS ENERGÉTICOS

La representación gráfica de los cuatro indicadores de DE_r , DE_c , HD_v y HD_i calculados para cada edificio que integra el barrio, se muestra en la Figura 5.31, Figura 5.32, Figura 5.33 y Figura 5.34, respectivamente.



Figura 5.31 Mapa energético urbano para el indicador DE_r .

Representar los indicadores en mapas urbanos energéticos permite identificar interesantes relaciones entre los diferentes aspectos evaluados.

En relación a la demanda de refrigeración, todos los edificios del barrio muestran un muy buen comportamiento, estando englobados mayoritariamente dentro del indicador A (menor de 4,7 kWh/m²año) y quedando solamente dos de ellos englobados en el indicador B (entre 4,7 y 7,6 kWh/m²año), adoptando así valores muy bajos. Aun así, se aprecian ligeras diferencias en aquellos edificios incluidos dentro de la tipología de manzana MU₂, que muestran demandas energéticas menores, debido a que están más condicionados por la presencia de obstáculos que generan situaciones de sombra. También se aprecia que, como ya se concluyó del análisis de la significancia de las covariables, los edificios de construcción más reciente muestran un peor comportamiento frente a la refrigeración, y así se refleja en el mapa energético.

Cabe indicar que, a priori, la demanda energética de refrigeración no genera grandes problemas, por lo que a la hora de tomar decisiones sobre una intervención de rehabilitación energética en el barrio, se deberán tener en cuenta, además, los demás indicadores.



Figura 5.32 Mapa energético urbano para el indicador DE_c

En cuanto a la demanda de calefacción, sí se aprecian notables diferencias en el comportamiento de los edificios. La DE_c oscila entre los indicadores E, F y G, alcanzando diferencias de hasta 134 kWh/m²año. Según se observa en el mapa de la Figura 5.32, los edificios que mayor demanda de calefacción presentan son los que se encuentran en las manzanas MU₂ (más antiguas). Así, la tipología MU₂ garantiza en los edificios una menor DE_c . También se observa que los edificios orientados hacia las calles principales que delimitan el barrio, presentan menor DE_c , explicado por la mayor anchura de estas, que implica menores ratios H/W. Así, las tonalidades rojizas del mapa permiten identificar con facilidad las manzanas urbanas con peor comportamiento energético frente a la calefacción, en el periodo invernal. El indicador de demanda energética de calefacción será decisivo a la hora de tomar decisiones sobre rehabilitación energética de los edificios del barrio y priorizar el orden de las intervenciones.



Figura 5.33 Mapa energético urbano para el indicador HD_v



Figura 5.34 Mapa energético urbano para el indicador HD_i

En cuanto al indicador de discomfort térmico en verano e invierno, los resultados se asemejan a los de la demanda de refrigeración y calefacción, respectivamente, por lo que pueden extraerse conclusiones similares.

5.7 CONCLUSIÓN

La implementación de la metodología en un caso real de estudio, como son la ciudad y el barrio seleccionados, pone de manifiesto que el modelo propuesto en el marco de esta tesis permite caracterizar el comportamiento energético pasivo de diferentes áreas urbanas, en el ámbito de la edificación residencial.

Cuando se propone una metodología de evaluación energética del parque edificatorio, el mayor reto es identificar una serie de covariables, tanto a escala urbana como de edificio, que afecten de forma significativa a los indicadores de evaluación y cuantificar con exactitud dicho efecto. Las covariables seleccionadas a través de la revisión de las HESU y las metodologías de evaluación ya existentes en la literatura, se muestran todas ellas adecuadas para integrar el modelo de predicción, pues todas son significativas y contribuyen a mejorar los modelos estadísticos diseñados, reduciendo el error asociado entre los valores reales y los predichos.

Como se desprende de su implementación en el presente capítulo, la metodología ha podido ser adaptada completamente a los condicionantes específicos de la región y del barrio, en lo que a solicitudes exteriores e interiores, taxonomía urbana y condiciones de soleamiento y sombras se refiere, como se establece en la definición de parámetros de cálculo en el Capítulo 2. Siguiendo el procedimiento establecido en cada una de las etapas descritas en el Capítulo 4, han podido ser definidas las cinco covariables específicamente para el barrio objeto de estudio, seleccionados los edificios representativos y evaluados estos energéticamente, teniendo en cuenta el abanico de hipótesis que pueden darse en este entorno urbano, lo que permite alcanzar un nivel detallado para la caracterización energética de cada edificio, a nivel individual. Así, los cuatro indicadores energéticos son determinados para todos los edificios, atendiendo a los condicionantes específicos del contexto urbano por los que se ven influenciados: manzana urbana en la que se ubican (MU), proporción de calle (H/W), orientación (O), factor de forma (S/V) y año de construcción (A). La extrapolación del diagnóstico energético del barrio en su totalidad se lleva a cabo agregando los resultados de cada edificio a una escala urbana, siguiendo un enfoque *bottom-up*.

Por otro lado, la representación de los resultados de los indicadores en mapas urbanos energéticos contribuye a la visualización gráfica, permitiendo identificar con facilidad aquellas manzanas o zonas urbanas que tienen asociado un peor comportamiento energético. Para ello, ha sido crucial el uso de un entorno SIG (gvSIG Desktop), que ha permitido tatar el gran volumen de información requerido de una forma georreferenciada, en base a la referencia catastral de cada edificio contenido en el área de estudio.

Con todo ello, se ensalzan cada uno de los seis requisitos que una metodología debe integrar, expuestos en el Capítulo 4, para poder llevar a cabo con objetividad y transparencia la evaluación energética pasiva de un parque edificatorio residencial existente.

Cabe indicar que, en este caso, el cálculo de los indicadores energéticos se ha realizado sobre un único barrio de la ciudad. No obstante, si la metodología se implementara sobre los demás barrios que la constituyen, podrían compararse e identificarse aquellos con una mayor necesidad de intervención a la hora de rehabilitarlos energéticamente, y priorizar así el orden de las actuaciones.

Como potencial aplicación de la metodología cabe destacar que esta permite a los diferentes agentes intervinientes en procesos de regeneración urbana, como arquitectos, arquitectos técnicos, ingenieros, urbanistas y autoridades locales, caracterizar el comportamiento energético de un municipio y representarlo a través de mapas urbanos energéticos, lo que constituye un instrumento muy útil para asistir durante los procesos de toma de decisión. Así pues, la identificación de los barrios más vulnerables desde el punto de vista de la eficiencia energética supone el punto de partida para iniciar procesos de rehabilitación, regeneración y renovación urbana, y priorizar las actuaciones en base a unos indicadores que evalúen dicho comportamiento de una manera cuantitativa y objetiva.

5.8 REFERENCIAS

- Asociación gvSIG, 2014. gvSIG Desktop.
- Aurea Consulting, 2015. ecoeficiente [WWW Document]. URL <http://ecoeeficiente.es/> (accedido 12.21.15).
- Blangiardo, M., Camaletti, M., 2015. Spatial and Spatio-temporal Bayesian Models with R-INLA. John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex.
- Box, Z., 2012. EL urbanismo de la nación. Arquitectura, urbanismo y capitalidad en el primer franquismo (1). Rev. Estud. Políticos (nueva época) 151-181.
- CEN, 2011. EN ISO 14683, Thermal bridges in building construction – Linear thermal transmittance – Simplified methods and default values.
- Comisión Europea, 2002. Directiva 2002/91/CE del parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2002 relativa a la eficiencia energética de los edificios. Comunidad Europea.
- CTE, 2013. Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, por la que se actualiza el Documento Básico DB-HE Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación, aprobado por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo. España.
- CTE, 2006. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. España.
- DesignBuilder UK, 2015. DesignBuilder software.
- Esteve-Comes, A., 2012. Paseando por las calles de Castellón. Castelló de la Plana.
- Excmo. Ayuntamiento de Castellón de la Plana, 2008. Plan General de Ordenación Urbana. Texto refundido 2008. Documento de trabajo. Castellón de la Plana.
- Gobierno de España, 1968. EH-68 Decreto 2987/1968 por el que se aprueba la instrucción para el proyecto y ejecución de obras de hormigón en masa y armado. España.
- Higuera, E., 2006. Urbanismo bioclimático ISBN: 978-84-252-2071-5. Gustavo Gili, Barcelona.
- Howard, E., 1899. Town and Country Planning Association.
- INE, 2015. Spanish Statistical Office [WWW Document]. URL <http://www.ine.es/>
- INLA, 2016. R-INLA project [WWW Document]. URL <http://www.r-inla.org/> (accedido 9.15.15).
- Instituto Valenciano de la Edificación, 2011. Catálogo de Soluciones Constructivas de Rehabilitación, 1a Edición. ed. Valencia.

- Ministerio de la Presidencia, 2013. Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios. España.
- Ministerio de la Presidencia, 2007. Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios RITE. España.
- Ministerio de la Vivienda, 1957. Normativa técnica de la edificación del Ministerio de Vivienda. España.
- Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1977. Orden de 28 de julio de 1977 por la que se desarrolla el Real Decreto 1650/1977, de 10 de junio, sobre Normativa de la Edificación. España.
- Ministerio de Vivienda, 1972. Decreto 3565/1972, de 23 de diciembre, por el que se establecen las Normas Tecnológicas de la Edificación NTE. España.
- NBE-CT-79, 1979. Real Decreto. Norma Básica de la Edificación sobre condiciones térmicas en los edificios. España.
- Oluca Montins, F., 1996. Guia d'arquitectura Castelló. Castelló de la Plana.
- Ortells Chabrera, V., 2004. Atles de Castelló de la Plana. Castelló de la Plana.
- Ortells, V., 1999. La ciudad de Castellón de la Plana. Castelló de la Plana.
- R Development Core Team, 2011. R: A Language and Environment for Statistical Computing.
- Sánchez Adell, J., Oluca Montins, F., Sánchez Almela, E., 1993. Elenco de fechas para la historia urbana de Castellón de la Plana. Castelló de la Plana.
- Temes Cordovez, R.R., 2009. La introducción del hormigón armado y su uso como sistema estructural de la vivienda en España . El caso concreto de la ciudad de Valencia, en: Actas del Sexto Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Valencia 21 - 24 de octubre de 2009. Instituto Juan de Herrera - ISBN: 978-84-9728-317-5, Madrid, pp. 1419-1429.
- U.S. Department of Energy, 2013. Energy Plus software.
- Ward, P., 1999. A history of domestic space. Privacy and the Canadian home. UBC Press, Vancouver.



6. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS COVARIABLES EN EL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO PASIVO

Propuesta **metodológica** para la caracterización del **comportamiento energético pasivo** del parque edificatorio **residencial** existente considerando su contexto **urbano**.

6.1 INTRODUCCIÓN

Como se ha justificado con la investigación desarrollada, el urbanismo es un aspecto clave que no puede ser obviado cuando hablamos de la eficiencia energética del parque edificado. Cuando se está redactando el planeamiento urbanístico de una ciudad, debería existir la obligatoriedad de justificar aspectos como son el diseño de las calles o la altura máxima de las edificaciones, no sólo con criterios funcionales y estéticos, sino también con criterios de eficiencia energética (Ministerio de Vivienda del Gobierno de España, 2010).

En este sentido, las ordenanzas municipales son una potente herramienta para ordenar la ciudad acorde a las necesidades de su población, de manera que se justifique desde el interés general y la utilidad pública (Higueras, 2006). Por ello, la aplicación de criterios bioclimáticos a los espacios públicos para conseguir un buen comportamiento pasivo de los edificios que los circundan resulta un gran reto para reducir el consumo energético de nuestras ciudades. Sin embargo, sorprenden las escasas referencias al tema en las ordenanzas municipales, limitándose en la mayoría de los casos a principios generales que no descienden a detalles concretos.

Se pueden nombrar algunos casos, como por ejemplo la Guía de Buenas Prácticas de Edificación Sostenible de Vilanova i la Geltrú, que establece criterios concretos en relación a la orientación, los cerramientos opacos y huecos, cubiertas, particiones interiores y gestión de residuos. También es interesante la Ordenanza Fiscal sobre el Impuesto de Construcciones, Instalaciones y Obras del Ayuntamiento de Tarragona, que incentiva fiscalmente la implantación de medidas en relación a la orientación, la ventilación interior, la iluminación natural, la inercia térmica y el uso de energías renovables. Destaca también la Ordenanza Municipal de Urbanización y Edificación Bioclimática de Tres Cantos en Madrid (Casanova et al., 2003), desarrollada por iniciativa de la administración local para adoptar una regulación normativa integradora con el fin de reducir el consumo de recursos en la creación de nuevos desarrollos urbanos, desde la perspectiva de la sostenibilidad. Esta resulta especialmente interesante, por estructurar las estrategias de acondicionamiento tanto activo como pasivo siguiendo el esquema de articulado de una ordenanza convencional. Su nivel de concreción alcanza no solo la edificación y el urbanismo, sino también criterios en relación al agua, residuos y de construcción de edificaciones, y propone estrategias para actuar también en tejidos ya consolidados.

A pesar de los ejemplos existentes en el territorio nacional, es evidente todavía el bajo grado de acogida que tiene la incorporación de criterios de eficiencia energética en las ordenanzas municipales y planeamientos urbanos por parte de las administraciones locales.

A la hora de integrar estos criterios en la legislación, las estrategias no deben ceñirse únicamente a nuevos ámbitos de planeamiento urbano, sino que deben atender también a las necesidades de las áreas urbanas consolidadas. Así, se pueden plantear dos situaciones diferentes:

- Planteamiento de una ordenanza para un tejido urbano ya existente
- Planteamiento de una ordenanza para un tejido urbano de nueva creación (nuevos desarrollos urbanos)

En el primer caso, tejido existente, la ciudad ya cuenta con una determinada configuración urbana, por tanto, el primer paso será evaluar críticamente si la configuración está contribuyendo a la creación de una ciudad energéticamente eficiente o no, y si caben criterios para el acondicionamiento pasivo de las edificaciones. La metodología propuesta en este trabajo permite evaluar energéticamente el parque edificatorio existente y realizar así un diagnóstico energético que

permita identificar barrios con mayor necesidad de intervención y renovación. Por ello, tiene una aplicación directa en este caso, como herramienta de diagnóstico. En este sentido, cuando los resultados del diagnóstico son desfavorables, las posibilidades de modificar un tejido urbano ya consolidado son escasas. Las actuaciones posibles probablemente estarán limitadas, especialmente si hablamos de acondicionamiento pasivo. Hay que tener en cuenta que las ciudades son sistemas rígidos en los que resulta muy complejo, o en algunos casos, simplemente imposible, modificar su configuración. Por tanto, nos encontramos ante un escenario que constituye un complejo reto.

En el segundo caso, la cuestión es menos compleja de resolver, pues podrán dictarse las directrices adecuadas para redactar un nuevo planeamiento urbano atendiendo a criterios de ahorro y eficiencia energética, previamente a ejecutar la urbanización del espacio público y definir las dimensiones, geometría y orientación de las parcelas urbanas.

El presente capítulo presenta un análisis en profundidad de la influencia de las covariables en el comportamiento energético pasivo del parque edificatorio residencial, a partir de los resultados de la evaluación energética obtenidos de implementar la metodología en el barrio Parque del Oeste de la ciudad de Castellón de la Plana, correspondiente a la Etapa II del Capítulo 5. A partir de las conclusiones extraídas de este análisis de resultados, se proporciona un conjunto de recomendaciones a tener en cuenta en el diseño de las covariables para, mejorar el comportamiento energético pasivo del parque edificatorio residencial. Siguiendo estas recomendaciones, se plantea una nueva configuración urbana para el barrio, lo que permite validar la reducción de la demanda energética global que supondría esta nueva configuración con respecto al entramado urbano existente actualmente. Finalmente, se establece un conjunto de estrategias, a escala urbana y de edificio, tanto para nuevas planificaciones urbanas como para tejidos urbanos ya consolidados.

La estructura que sigue el capítulo se muestra en la Figura 6.1.

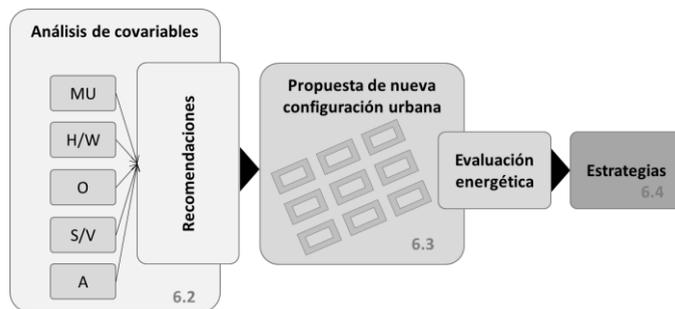


Figura 6.1 Estructura del Capítulo 6

6.2 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS COVARIABLES SOBRE LOS INDICADORES ENERGÉTICOS

En el Capítulo 5 se ha desarrollado un modelo para determinar el comportamiento energético pasivo del parque residencial que conforma el barrio tomado como caso de estudio. Las cuatro ecuaciones que componen el modelo tienen en cuenta, además de los aspectos relacionados con el edificio, que vienen determinados por las covariables factor de forma del edificio (S/V) y año de construcción (A),

los aspectos de la configuración urbana, que vienen determinados por las covariables orientación (O), tipo de manzana urbana (MU) y proporción de calle (H/W). El conjunto de las cinco covariables determinan la situación en la que se encuentra un edificio, no como elemento aislado, sino como parte integrante de una determinada área urbana. Las ecuaciones desarrolladas permiten obtener los valores de los indicadores energéticos demanda energética (DE_r y DE_c) y horas de desconfort (HD_v y HD_i), ambos en situación de invierno y de verano.

Como profundización del apartado 5.5.4 del Capítulo 5, en este apartado se analizan aisladamente cada una de las cinco covariables con el fin de poder extraer recomendaciones que puedan aplicarse a entornos urbanos residenciales para mejorar su comportamiento energético pasivo.

Por lo tanto, en el presente apartado se analiza la influencia que cada una de las covariables tiene sobre los cuatro indicadores energéticos (DE_r , DE_c , HD_v , HD_i) y se describen las pautas a tener en cuenta en el diseño de las mismas. Los efectos fijos, β_i , corresponden a los coeficientes que determinan el efecto de cada covariable en las cuatro ecuaciones obtenidas, para el caso de aplicación utilizado. Se recuerdan dichas ecuaciones.

$$DE_r = 2,6480 + (0,3336 \cdot A) + (-6,5815 \cdot S/V) + (0,0013 \cdot O) + (-0,4637 \cdot H/W) + (-0,4372 \cdot MU)$$

$$DE_c = 46,8932 + (-17,6330 \cdot A) + (118,4408 \cdot S/V) + (-0,0505 \cdot O) + (19,8277 \cdot H/W) + (14,5047 \cdot MU)$$

$$HD_v = 6,9152 + (-2,1639 \cdot A) + (13,6464 \cdot S/V) + (-0,0015 \cdot O) + (0,8659 \cdot H/W) + (0,9760 \cdot MU)$$

$$HD_i = 44,5077 + (-0,9679 \cdot A) + (12,5778 \cdot S/V) + (-0,004 \cdot O) + (0,8951 \cdot H/W) + (0,9202 \cdot MU)$$

Como se concluyó en el Capítulo 5, todas las covariables son significativas y se ordenan, según su nivel de significancia, de mayor a menor, de la siguiente forma: S/V, A, H/W, MU y O. No obstante, el nivel de significancia de la covariable H/W está muy próximo al de A, por lo que son significativas prácticamente por igual. Así, se observa que las dos covariables relacionadas con el edificio (S/V y A) y la proporción de calle (H/W), relacionada con el urbanismo, son muy significativas y, por tanto, las que tienen mayor influencia en el comportamiento energético del parque edificatorio residencial. Seguidamente, se sitúa MU y, finalmente, la O, que se muestra como la menos significativa de las cinco.

En los siguientes apartados se analiza individualmente el efecto de cada una de estas covariables sobre las variables respuesta (o indicadores energéticos), siguiendo el orden establecido por nivel de significancia. Los gráficos presentados en la Figura 6.2, Figura 6.3, Figura 6.5, Figura 6.9 y Figura 6.11 representan los resultados globales de la simulación energética llevada a cabo en la Etapa II del caso de aplicación.

6.2.1 FACTOR DE FORMA (S/V)

El factor de forma resulta la covariable más significativa. Los coeficientes para los cuatro indicadores, DE_r , DE_c , HD_v y HD_i , adoptan los valores más altos, siendo -6,58, 118,44, 13,65 y 12,58, respectivamente.

La Figura 6.2 muestra los resultados obtenidos de la simulación energética en la Etapa II del caso de aplicación para de las cuatro variables respuesta en función de la covariable S/V, para las dos tipologías de manzana, MU₁ y MU₂.

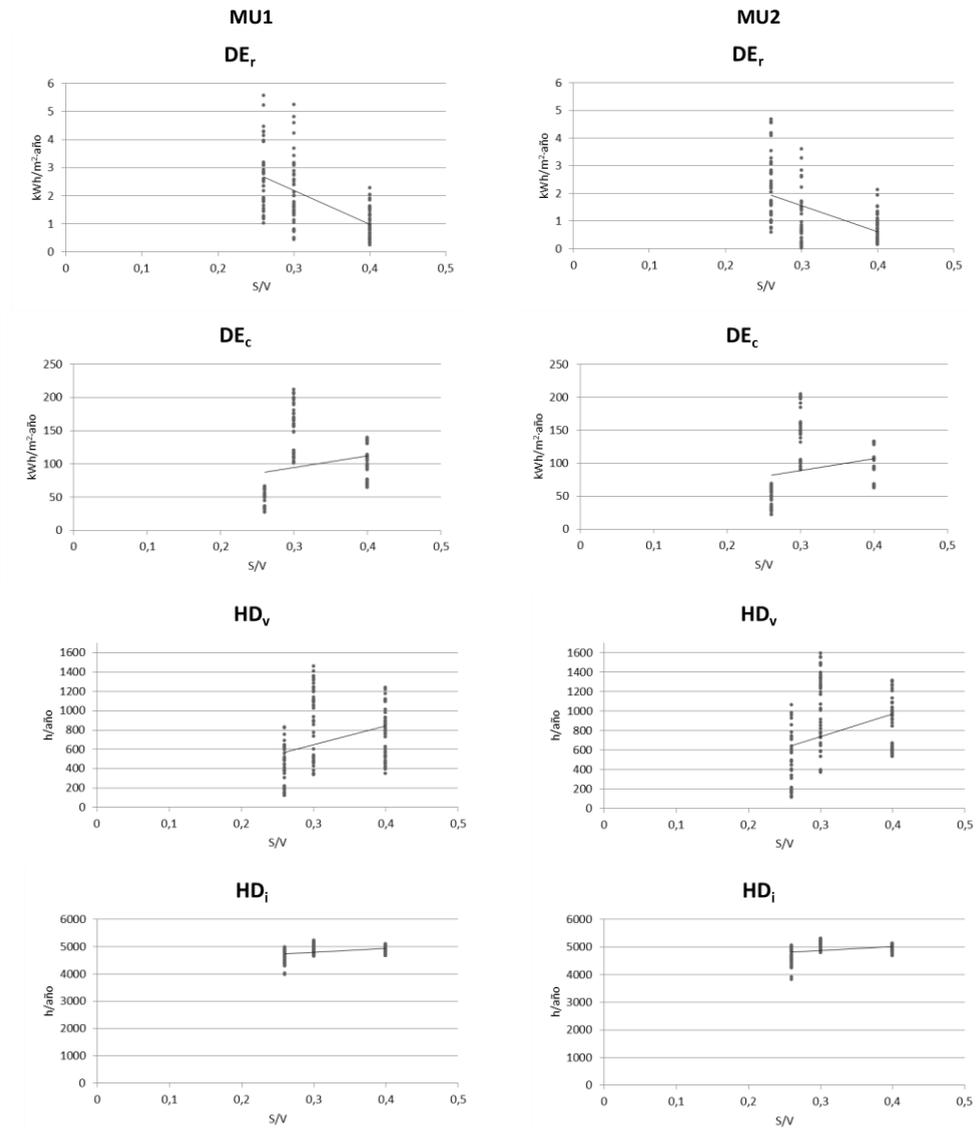


Figura 6.2 Resultados de las variables respuesta (DE_r , DE_c , HD_v , HD_i) en los tres factores de forma (S/V), para la MU_1 y MU_2

Se observa que la demanda de refrigeración descende, acercándose al valor 0, a medida que el factor de forma del edificio (S/V) aumenta, es decir, cuando el edificio es menos compacto. Sin embargo, con la demanda de calefacción ocurre precisamente al contrario. Esta disminuye cuando el edificio es más compacto (menor S/V). Por tanto, se puede afirmar que los edificios compactos presentan un mejor comportamiento energético en cuanto a calefacción, de manera que requieren

menor cantidad de energía durante el invierno, pero no frente a la refrigeración, pues requieren mayor cantidad de energía en verano para alcanzar las condiciones óptimas de confort.

Conclusión relativa a S/V:

Los edificios más compactos (menor factor de forma, S/V) implican menores demandas de calefacción y menos horas de disconfort, tanto en invierno como en verano. Sin embargo, presentan un peor comportamiento frente a la refrigeración.

6.2.2 AÑO DE CONSTRUCCIÓN (A)

La segunda covariable más significativa es el año de construcción. La demanda energética media de las simulaciones energéticas ha sido representada en los cinco periodos temporales establecidos (Figura 6.3).

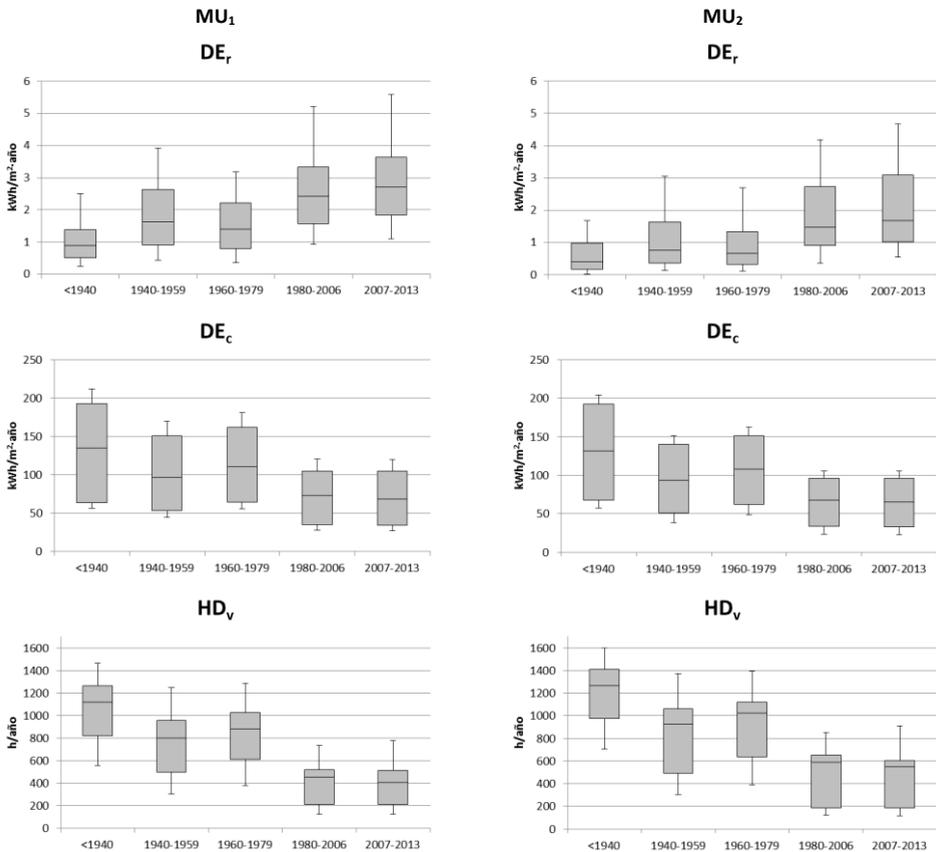


Figura 6.3 Resultados de las variables respuesta (DE_r, DE_c, HD_v, HD) en los cinco periodos temporales, para la MU₁ y MU₂

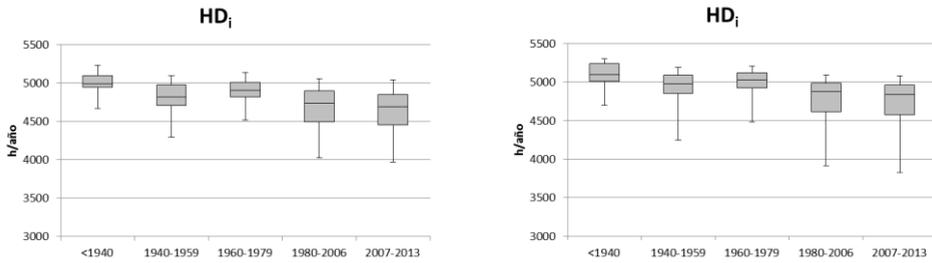


Figura 6.3 Resultados de las variables respuesta (DE_r , DE_c , HD_v , HD_i) en los cinco periodos temporales, para la MU_1 y MU_2 (continuación)

Puesto que las transmitancias térmicas de los elementos constructivos del edificio son las que influyen en su demanda y horas de desconfort, se estudia a través de la Figura 6.4 la evolución de los valores que adoptan sus U a lo largo de los cinco periodos temporales.

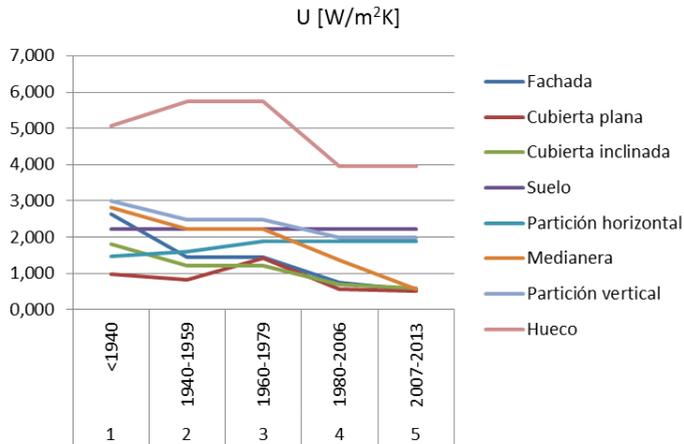


Figura 6.4 Evolución temporal de la transmitancia térmica (kWh/m^2 año) de los elementos de envolvente térmica

Respecto a la demanda de calefacción, se puede observar que la tendencia descendente es la misma a lo largo del tiempo. A continuación, se realiza un análisis de los factores que influyen en dicha tendencia, a lo largo de los cinco periodos:

- La mayor demanda energética de calefacción, próxima a los $200 kWh/m^2$ año, recae en los edificios construidos anteriormente a 1940, debido a las deficientes condiciones de las soluciones constructivas empleadas para ejecutar su envolvente. En este primer periodo, la fachada de los edificios estaba constituida generalmente por muros de carga de una sola hoja que formaban parte de la estructura del edificio que, aunque eran de gran espesor, carecían de aislamiento térmico, lo que hacía alcanzar los valores muy altos de transmitancia térmica. Sin embargo, veremos más adelante que el grueso de los muros constituye una característica favorable para la demanda de refrigeración. La transmitancia

térmica de la cubierta inclinada también alcanza su valor más alto en este periodo. No ocurre lo mismo con la cubierta plana, donde la existencia de una cámara de aire ventilada hace mejorar su comportamiento energético. Los huecos, formados generalmente por marcos de madera y vidrios monolíticos tienen una transmitancia elevada, sin embargo, mejor que en sucesivos periodos temporales, cuando los marcos de madera son sustituidos por marcos metálicos, grandes conductores del calor.

- En el segundo periodo temporal, de 1940 a 1959, la demanda de calefacción experimenta un notable descenso, situándose en torno a los 150 kWh/m²año. La introducción de las estructuras de hormigón armado hace abandonar a las fachadas su función estructural, convirtiéndose estas en muros de doble hoja con cámara de aire intermedia, que mejora considerablemente la transmitancia térmica de este elemento constructivo (de 2,628 a 1,438 W/m²K). La cubierta plana “a la catalana” ya utilizada en el periodo anterior, no experimenta cambios sustanciales en la transmitancia térmica, únicamente se reduce ligeramente por la inclusión de barrera de vapor. La cubierta inclinada, tradicionalmente de madera con viguetas y rastreles, pasa a convertirse en una cobertura inclinada sobre un soporte de tabiquillos conejeros, el cual descansa sobre un forjado horizontal de hormigón, generando una cámara de aire ventilada que funciona como amortiguador térmico entre el ambiente interior del edificio y el exterior, lo que reduce la transmitancia térmica de la solución de cubierta. El uso de marcos metálicos en los huecos se generaliza, sufriendo un empeoramiento de la transmitancia térmica de 5,078 a 5,754 W/m²K.
- En el tercer periodo, de 1960 a 1979, se observa un aumento de la demanda energética de calefacción, de en torno a 10 kWh/m²año. Los movimientos migratorios de la población desde el entorno rural a las ciudades conllevaron procesos de construcción precipitados para dar respuesta a la alta demanda de viviendas, en los que se emplearon técnicas constructivas más deficientes. La cubierta “a la catalana” es sustituida por la cubierta “a la madrileña”, la cual no incorpora cámara de aire entre sus capas, lo que hace aumentar considerablemente la transmitancia térmica. Hasta este periodo, no existe en España ninguna legislación relativa a ahorro de energía, por tanto, ninguna exigencia que obligue al uso de aislamiento térmico en la envolvente de los edificios.
- El cuarto periodo, de 1980 a 2006, viene delimitado por la entrada en vigor de la primera Norma Básica sobre Condiciones Térmicas en los Edificios (NBE-CT-79, 1979) y del Código Técnico de la Edificación (CTE, 2006). La primera de ellas, consecuencia de la crisis del petróleo de 1970 obligó a replantear los requerimientos térmicos en los edificios debido al elevado consumo energético que estos suponen y constituye la primera legislación en España que obliga a disponer un material de aislamiento térmico mínimo en la envolvente de los edificios, principalmente en fachadas y cubiertas. Los edificios construidos a partir del año 1980, por tanto, ya incorporan algún tipo de aislamiento y así se refleja en la considerable reducción de las transmitancias térmicas de los elementos de fachada y cubierta. La fachada incorpora un aislamiento de unos 2 cm de en su cámara de aire y las cubiertas, tanto la plana como la inclinada, de unos 4 cm. Las medianeras empiezan a constituirse con cerramiento de doble hoja con cámara de aire intermedia que, aunque en la mayoría de veces se encuentra sin aislamiento, contribuye a reducir la transmitancia térmica. Los huecos generalmente están formados por marcos de aluminio con elevada conductividad y vidrios dobles con cámara de aire intermedia entre ambas láminas de vidrio que hace mejorar el comportamiento del conjunto global del hueco (de 5,754 en el periodo anterior a 3,966 W/m²K). Todo ello tiene un efecto muy considerable en la demanda energética de calefacción de los edificios, que experimenta una reducción en torno a los 60 kWh/m²año.

- El quinto y último periodo temporal, incluye a los edificios construidos a partir del año 2007, año en que entró en vigor el CTE (2006), hasta 2013, cuando entra en vigor la actualización del CTE (2013). Durante el periodo de vigencia del CTE (2006), su DB HE tiene como principal objetivo limitar la demanda energética de los edificios, estableciendo unos valores máximos y límite de transmitancia térmica para los diferentes elementos de la envolvente térmica. El endurecimiento de los criterios de la NBE-CTE-79 anterior supone un importante avance. No obstante, este endurecimiento no es demasiado relevante y así se refleja en la sutil reducción de la demanda energética de calefacción de los edificios construidos en este periodo. El ligero aumento del espesor de los aislamientos térmicos (de 2 a 4 cm en fachadas, y de 4 a 5 cm en cubiertas) y de la obligatoriedad de incluirlo en medianeras (en muchas de las zonas climáticas) no es suficiente para conseguir una reducción significativa de la demanda.

Con respecto a la demanda energética de refrigeración, la tendencia es precisamente inversa a la anterior: en periodos de construcción más actuales, la demanda de refrigeración aumenta, alejándose del valor 0. Ello se debe a la inercia térmica que aporta la tipología de cerramiento de fachada presente en los edificios más antiguos, constituida por muros de carga de fábrica de ladrillo de una sola hoja, con un elevado espesor y una alta densidad. Estas dos características hacen que se aproveche excepcionalmente bien la inercia térmica del cerramiento, manteniendo la temperatura operativa interior del edificio alrededor de la temperatura de consigna de verano. Las dos propiedades que definen la inercia térmica de un elemento, el desfase de la onda térmica y la amortiguación total, expresan el retardo de las altas temperaturas exteriores en transferirse hacia el interior del edificio. El cálculo de ambas propiedades del cerramiento de fachada indican una elevada amortiguación térmica, especialmente durante el verano, que consigue evitar situaciones de disconfort y hace prácticamente nula la demanda de refrigeración. Además, la influencia que los obstáculos presentes en el entorno (edificios colindantes) tienen sobre la demanda energética de refrigeración es muy relevante, lo que contribuye también a reducir la demanda de refrigeración. En el Anexo III Análisis detallado de la demanda de refrigeración¹ se profundiza en la influencia de la inercia térmica y de los obstáculos solares, lo que ha permitido llegar a esta conclusión.

Conclusión relativa a A:

Existe una tendencia general a disminuir la demanda de calefacción y las horas de disconfort en invierno en los edificios de construcción más reciente. Tan solo se observa un ligero cambio de tendencia en los edificios construidos en el periodo 3 (1960-1979), debido a la mengua en la calidad constructiva de los cerramientos de dicha época.

Existe una tendencia general en aumentar la demanda de refrigeración en los edificios más actuales, que responde a la pérdida de inercia térmica de los cerramientos de la envolvente. Sin embargo, las horas de disconfort en verano son menores en los edificios de más reciente construcción.

6.2.3 RATIO ALTURA-ANCHURA DE CALLE (H/W)

La Figura 6.5 presenta los resultados de los cuatro indicadores en función de la ratio H/W, que define la proporción de la calle y es responsable de la accesibilidad solar en las fachadas de los edificios. Los resultados se muestran por separado para las dos tipologías de manzana, MU₁ y MU₂, lo que permite comparar y analizar también la influencia de estas en los indicadores energéticos.

¹ En el Anexo III Análisis detallado de la demanda de refrigeración se profundiza en el estudio de las causas que influyen en la demanda energética de refrigeración, a partir de las simulaciones dinámicas con la herramienta DesignBuilder. A partir de este análisis, se concluye que la inercia térmica y el soleamiento influyen notablemente en dicha demanda.

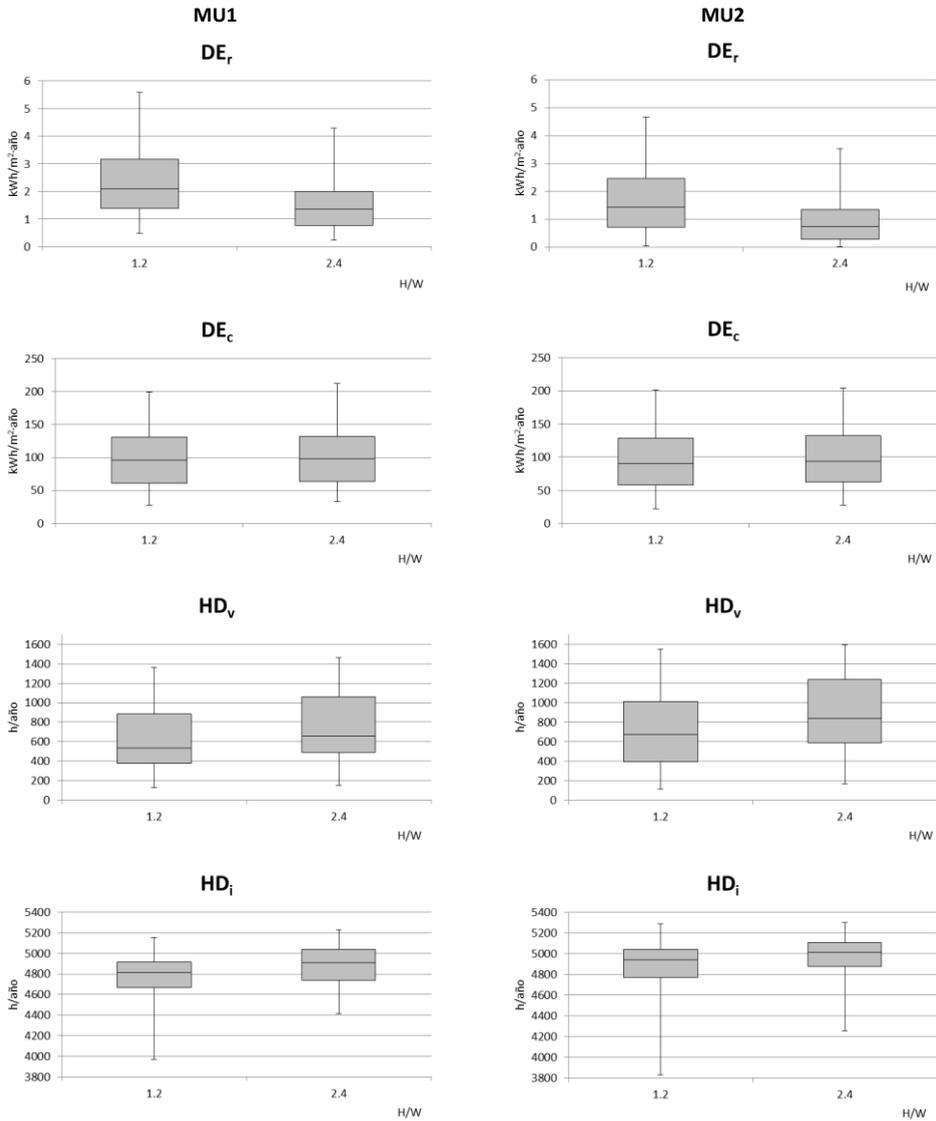


Figura 6.5 Resultados de las variables respuesta (DE_r , DE_c , HD_v , HD_i) en las dos ratios H/W, para la MU₁ y MU₂

En cuanto a la demanda de refrigeración, se observa que esta es menor en edificios ubicados en calles con una ratio de 2,4. La causa es que ratios altas de H/W implican calles estrechas con edificios altos, las cuales limitan la accesibilidad solar. Este fenómeno puede ser perjudicial en invierno, cuando interesa que la mayor parte posible de la radiación solar llegue a las fachadas de los edificios y penetre por sus huecos para calentar el interior del edificio de manera natural, y así se aprecia con la DE_c , que es mayor en la ratio H/W_{2,4}. Sin embargo, ratios altas de H/W son positivas en condiciones de verano, cuando las ganancias solares son poco deseadas y precisamente interesa

el fenómeno contrario al anterior, es decir, evitar que la radiación solar penetre a través de los huecos, incrementando la demanda de refrigeración. La proximidad entre edificios genera sombras importantes que propician esta situación.

Para estudiar con mayor detalle el efecto de la ratio H/W, se toma como ejemplo la hipótesis H82 (MU₁, ancho de calle 10 m, orientación S, tipología edificatoria PF_{M(≤4)}, periodo de construcción 1), correspondiendo a una ratio H/W_{2,4}, y se compara con la H102, siendo esta la homóloga de la H82 pero considerando un ancho de calle de 20 m (H/W_{1,2}). La Figura 6.6 muestra los datos de radiación solar en cada uno de los meses del año y los resultados de ganancias solares por ventanas exteriores debidos al acceso de la radiación solar a través de los huecos del edificio, en la H82 y la H102.

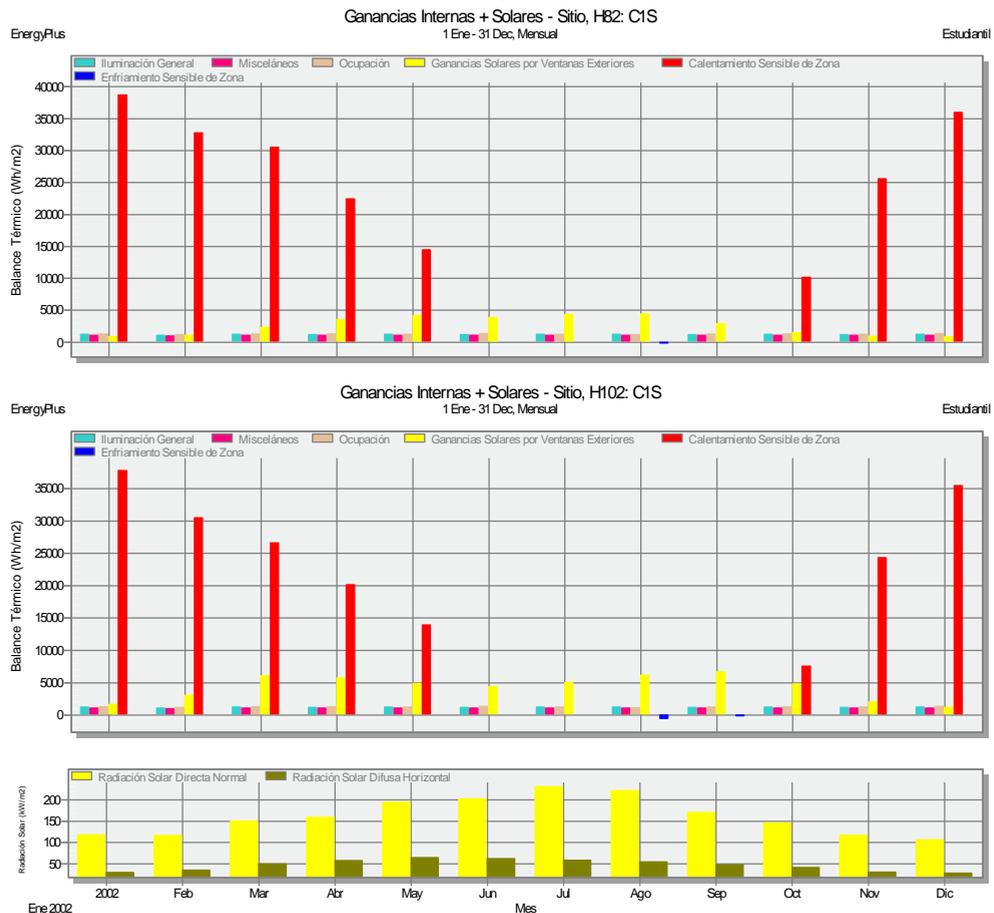


Figura 6.6 Datos sobre radiación solar propia del sitio y resultados de ganancias internas y solares en las H82 y H102

Se aprecia que, para la misma intensidad de radiación solar, en la H102 (H/W_{1,2}) las ganancias solares son mayores tanto en invierno como en verano. Incluso, se observa un incremento en los meses de primavera y otoño y un descenso en los meses de verano, lo que resulta beneficioso. En verano, mayores ganancias hacen aumentar la demanda de refrigeración, pero en invierno, dado

que interesa un aprovechamiento de la radiación mayor, el efecto es beneficioso para reducir la demanda de calefacción.

En el caso de H/W , las demandas energéticas tienen su efecto en las horas de desconfort, pues se observa que cuando la demanda de refrigeración o calefacción aumenta, también lo hace el número de horas de desconfort. Entre ambos indicadores (HD_v y HD_i), siempre es mayor el número de horas de desconfort durante en invierno (HD_i), pues además de abarcar un periodo temporal más amplio, la demanda de calefacción es considerablemente mucho mayor.

Por tanto, se puede concluir que ratios bajas de H/W hacen mejorar el comportamiento energético del parque edificatorio. Analizada la situación existente en el barrio, surge la inquietud de determinar cuál es la ratio H/W óptima que garantice unas adecuadas condiciones de soleamiento, especialmente en el periodo invernal, cuando la captación de radiación solar debe ser aprovechada para reducir la demanda de calefacción.

Así pues, la distancia entre los edificios necesaria para garantizar el soleamiento en un día concreto del año, puede establecerse mediante el método gráfico (por medio de cartas solares) y analítico, en función del ancho de calle, el acimut solar y el acimut del plano de la edificación. Esta relación se expresa en la Figura 6.7:

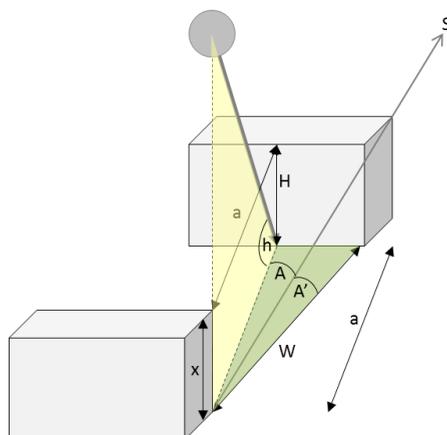


Figura 6.7 Parámetros para el cálculo de H/W (Granados, 2006)

donde,

H altura de la edificación que recibe sol medida desde su coronación

W anchura de la calle

A acimut del sol

A' acimut de la normal al eje de la edificación

h elevación solar

a segmento determinado entre las dos edificaciones por el plano vertical de acimut A

Geoméricamente, puede establecerse la siguiente relación:

$$W = a \cdot \cos(A + A')$$

$$H = a \cdot \operatorname{tg} h = \frac{W}{\cos(A + A')} \cdot \operatorname{tg} h = d \cdot \sec(A + A') \cdot \operatorname{tg} h$$

de donde se obtiene la siguiente relación H/W para garantizar el soleamiento en un momento del año concreto:

$$\frac{H}{W} = \sec(A + A') \cdot \operatorname{tg} h$$

Se considera que, a efectos de eficiencia energética, un elemento tiene accesibilidad solar si recibe al menos dos horas de radiación solar directa durante el solsticio de invierno, que se produce el 21 de diciembre (Higueras, 2006). Este momento es el más desfavorable del año, por lo que, cumpliendo este requisito en el solsticio invernal, se asegura que el resto del año se reciban más horas de sol.

Así, para la latitud de Castellón de la Plana, 39° 59' 11" (lo que equivale a 39,98°, en grados decimales), en el solsticio de invierno la elevación solar es de 26,61° a las 12:00 hora solar, según se observa en la carta solar de la Figura 6.8.

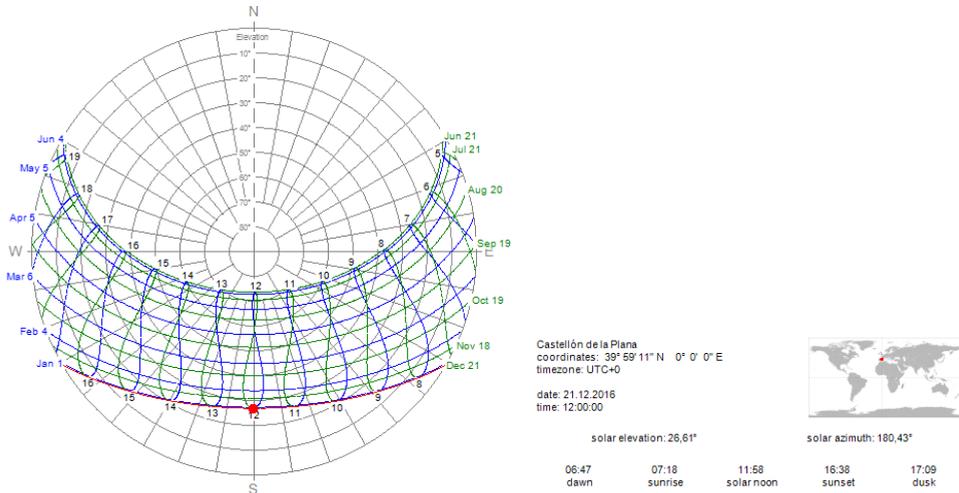


Figura 6.8 Carta solar estereográfica para la latitud 39,98° (Matusiak, 2016)

Para un edificio orientado perfectamente a S (acimut de la edificación 0°), la relación H/W a las 12:00 hora solar (acimut solar 0°) equivale a 0,50, lo que implica que el ancho de la calle (W) debe ser el doble de la altura de la edificación (H). Ello está en la línea con lo propuesto por la herramienta CGYM (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010), en su indicador CGYM.7 Proporción de calle, por lo que pueden adoptarse los criterios establecidos en dicho indicador (H/W < 0,5: excelente; 0,5 < H/W < 1: buena; 1 < H/W < 2: suficiente; 2 < H/W < 3,5: insuficiente; H/W > 3,5: muy insuficiente).

De aplicar la expresión anterior, se observa que, cuando la orientación de las edificaciones no es exactamente a S, sino que la normal de su fachada forma un pequeño acimut, la W puede reducirse. Este hecho conlleva la ventaja de poder diseñar un ancho de calle (W) más reducido, sin minorar las

condiciones de soleamiento. De esta manera, se lograrían tejidos urbanos más compactos, admitiendo una mayor edificabilidad.

Conclusión relativa a H/W:

Ratios H/W altas (calles estrechas en relación a la altura de los edificios enfrentados) hacen aumentar la demanda de calefacción, mientras que contribuyen a disminuir la demanda de refrigeración.

La ratio H/W óptima adopta un valor máximo de 0,50. Este valor podría aumentarse ligeramente si la retícula se posiciona con un pequeño ángulo hacia el SE o SO, favoreciendo la configuración de tejidos urbanos más compactos.

6.2.4 MANZANA URBANA (MU)

La Figura 6.9 analiza de forma conjunta los resultados de la covariable MU.

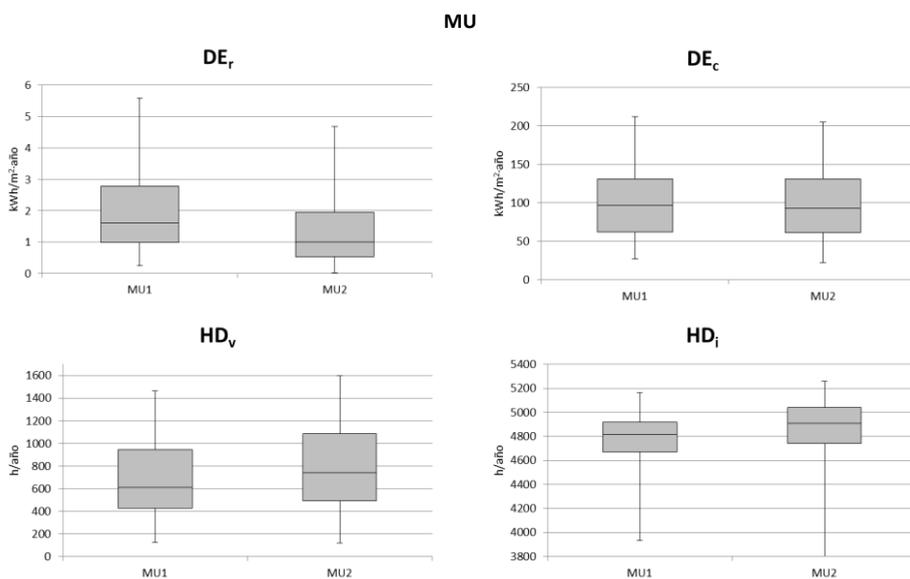


Figura 6.9 Resultados de las variables respuesta (DE_r, DE_c, HD_v, HD_i) en MU₁ y MU₂

Si observamos los resultados globales de los indicadores energéticos, se observa que:

- La demanda de refrigeración (DE_r) es menor en MU₂
- La demanda de calefacción (DE_c) es prácticamente la misma en MU₂ y MU₁
- Las horas de disconfort en verano (HD_v) son mayores en MU₂
- Las horas de disconfort en invierno (HD_i) son mayores en MU₂

En cuanto al indicador relativo a las horas de disconfort, se aprecia un ligero aumento en la tipología de manzana MU₂, tanto para el periodo estival como para el invernal. Esto indica que las manzanas

cerradas sin grandes patios interiores reducen, por un lado, la posibilidad de ganancias solares durante el invierno, las cuales se traducen en ganancias térmicas naturales que dejan de llegar al interior del edificio y que harían disminuir la demanda de calefacción. Y, por otro lado, reducen también la posibilidad de ventilación natural en los edificios, ocasionando un aumento en la demanda de refrigeración. El hecho de existir un patio de manzana amplio en MU₁, genera una doble fachada en los edificios: la que recae al viario público exterior y la que recae al interior del patio de manzana. La amplitud del patio a menudo genera una distancia entre las fachadas internas de los edificios incluso mayor que el ancho de calle que separa sus fachadas exteriores, lo que aumenta la accesibilidad solar y posibilita la ventilación natural cruzada entre fachadas opuestas, propiciando así un mejor comportamiento energético.

Para el diseño de los edificios son recomendables geometrías de edificaciones alargadas en el eje E-O, con la mayor superficie de fachada a S, preferiblemente, y a N; lo que puede extenderse a la geometría de la manzana urbana (Olgyay, 1963). Según el mencionado autor, la relación recomendada entre la profundidad de la edificación y la longitud para obtener una máxima superficie orientada a S es como mínimo de 1,5, con la fachada menor (o con menor número de huecos) orientada a O, para zonas climáticas de la región templada, como es el caso. Ello puede extenderse a la forma de la manzana urbana, por lo que optará por la proporción que se observa en la Figura 6.10.

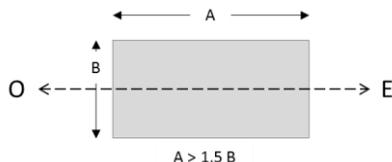


Figura 6.10 Proporción de la manzana

Conclusión relativa a MU:

La tipología de manzana MU₁, con grandes patios de manzana interiores, resulta más favorable en el comportamiento energético de los edificios, pues contribuye a reducir la demanda energética de calefacción (significativamente más elevada que la de refrigeración). Las horas de disconfort son menores también en dicha tipología de manzana.

La proporción adecuada de manzana cumple la relación $A > 1,5B$, según la Figura 6.10.

6.2.5 ORIENTACIÓN (O)

Esta covariable se muestra como la menos significativa de las cinco que integran el modelo. Sin embargo, como se concluyó en el Capítulo 5, la consideración de la misma en las ecuaciones de predicción contribuye a mejorar el modelo. El análisis más pormenorizado sobre la orientación llevado a cabo en el presente apartado tiene por objeto justificar la baja significancia de la orientación en el modelo, la cual a priori, parecería susceptible de influir notablemente en el comportamiento energético del parque edificado.

La Figura 6.11 compara los resultados de las cuatro orientaciones solares de la fachada principal de los edificios, diferenciando entre la MU₁ y la MU₂.

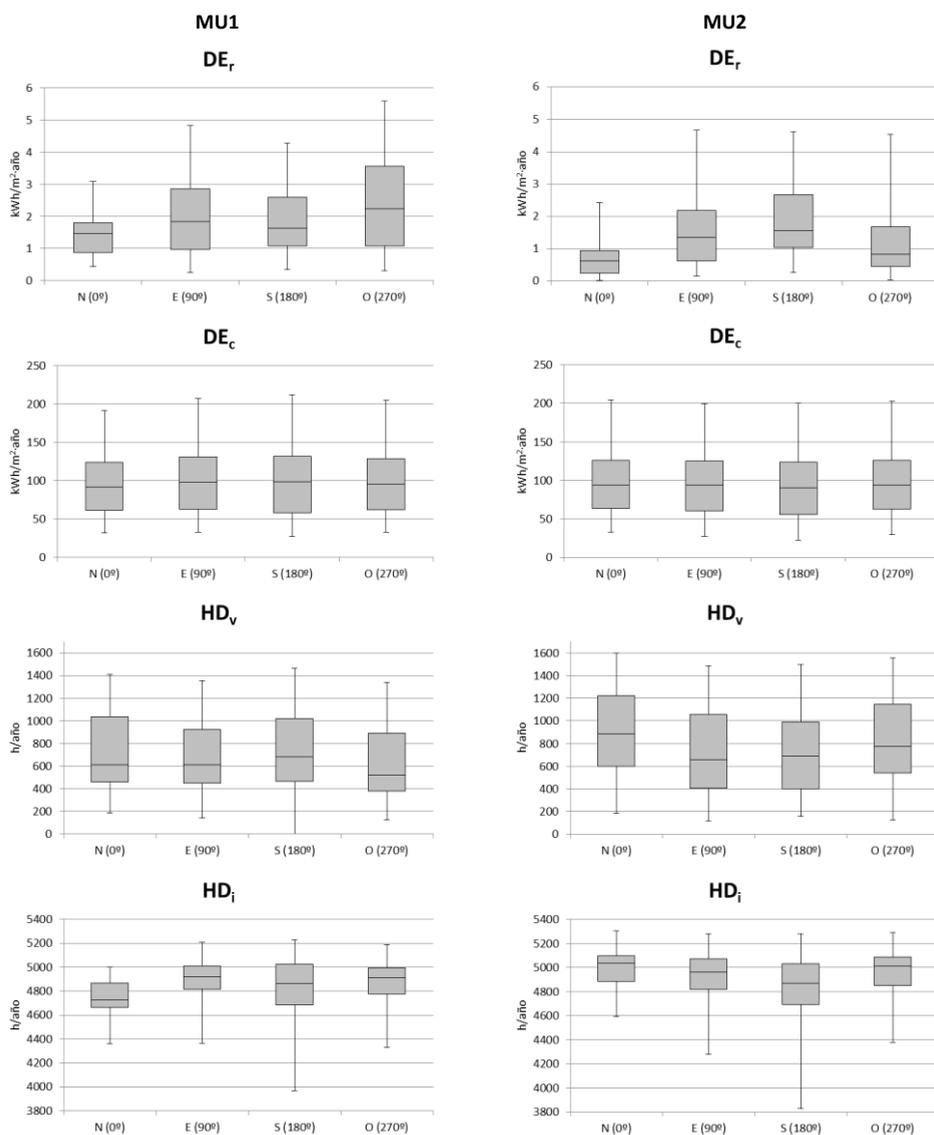


Figura 6.11 Resultados de las variables respuesta (DE_r , DE_c , HD_v , HD_i) en las cuatro orientaciones, para la MU_1 y MU_2

En cuanto a los resultados de demandas energéticas, es complejo extraer conclusiones globales aplicables a los dos tipos de manzana urbana. La MU_1 proporciona al edificio dos orientaciones opuestas. Cuando la fachada principal está orientada a S, la fachada que recae al patio de manzana está orientada a N, y cuando la fachada principal está orientada a E, la fachada al patio lo está a O. Lo mismo ocurre con las otras dos orientaciones, N y O. Por lo que en el caso de MU_1 , como se observa en los gráficos de DE_r y DE_c , existe muy poca variación entre los datos, especialmente entre

las parejas de orientaciones S-N y E-O. Se observa que en MU_1 , hay incluso menor DE_c en N, porque la amplitud del patio puede ser incluso mayor que la de la calle, ofreciendo a la respectiva fachada S mayor posibilidad de soleamiento.

En el caso de MU_2 , el edificio únicamente consta de una fachada que recae a la calle y que tiene una determinada orientación. Así pues, la variabilidad de DE_r entre las cuatro orientaciones es notable, siendo de menor a mayor: fachada N, E y O prácticamente por igual, y S. En la DE_c los valores están muy equiparados, lo que hace pensar que, durante los meses de invierno, en los que la elevación solar es pequeña, la ratio H/W de calle determina en mayor medida las posibilidades de accesibilidad solar, por ello esta es más significativa.

En relación a las horas de discomfort, se observa una tendencia similar entre la DE_r y la HD_v y la DE_c y la HD_r , tanto en MU_1 como en MU_2 . Sin embargo, en MU_1 el discomfort térmico es inferior. Por ello, resulta más favorable la tipología de manzana MU_1 , pues ofrece en general un mejor comportamiento pasivo.

Del análisis de estos resultados se extrae que la configuración urbana influye enormemente en los resultados de las variables respuesta, pues modifica la influencia natural que la orientación suele tener en edificios aislados. Por ejemplo, una fachada orientada a S, susceptible de recibir el mayor porcentaje de soleamiento de un día de invierno, puede estar obstaculizada por la presencia de un edificio alto y próximo y no recibir apenas sol.

Para ilustrar la gran influencia de la configuración urbana en el comportamiento energético pasivo del parque edificado, y en particular, su efecto sobre la orientación, se han realizado un conjunto de nuevas simulaciones que dan prueba de esta conclusión. Se toma el edificio de tipología $PF_{M(>4)}$, el cual tiene cuatro viviendas por planta y se analiza la misma vivienda (tipo B de planta 6, ver Figura 6.12), con sólo una fachada, en las cuatro orientaciones. Las simulaciones se realizan suponiendo el edificio aislado, libre de obstáculos en las inmediaciones que puedan ocasionar sombras. Esto permite identificar la demanda energética asociada a única vivienda orientada en las cuatro orientaciones, para su comparación, tal y como se muestra en la Tabla 6.1.

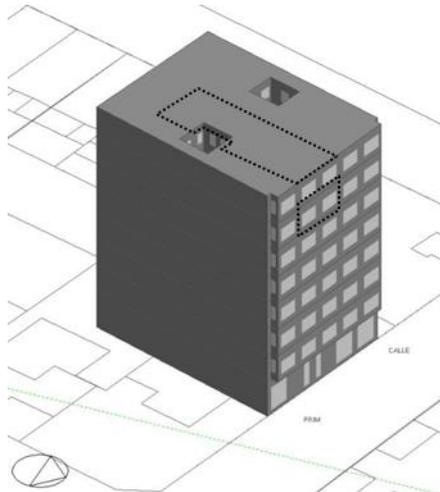


Figura 6.12 Vivienda tipo B de la planta 6 en el edificio $PF_{M(>4)}$

Tabla 6.1 Comparativa de DE y HD de una misma vivienda orientada a N, E, S y O

	DE, [kWh/m ² año]	DE _c [kWh/m ² año]	HD _v [h/año]	HD _i [h/año]
Vivienda a N	6,60	20,54	85,83	4.080,00
Vivienda a E	14,26	11,98	80,33	2.447,51
Vivienda a S	10,36	7,77	82,00	3.038,66
Vivienda a O	13,72	18,70	82,16	3.613,16

Los resultados expuestos en la Tabla 6.1 indican que, cuando no hay obstáculos alrededor, la demanda energética de refrigeración evoluciona, de menor a mayor, de la siguiente forma: N, S, E y O. Y la demanda de calefacción: S, E, O y N. Los resultados atienden a la lógica de los fundamentos radiación solar y demuestran pues, que la configuración urbana puede influir enormemente en dicha demanda.

Además, cabe observar que la demanda de refrigeración se aprecia mucho mayor cuando el edificio se encuentra aislado, en torno a 14 kWh/m²año en las orientaciones este y oeste, valor muy alejado de los 1-2 kWh/m²año obtenidos en dichas orientaciones cuando el edificio se encuentra ubicado entre medianeras, como es el caso en el contexto urbano del barrio bajo estudio.

Analizada la influencia de la orientación del edificio, esta debe ser contextualizada en la ordenación urbana, pues la estructura del viario público determina la orientación de las fachadas de los edificios. Las calles con eje N-S, generan fachadas orientadas al E y al O. Estas fachadas reciben horas de sol de mañana o de tarde, respectivamente. Esta opción permite que todas las fachadas tengan horas de sol, pero nunca en las horas centrales del día, cuando se puede lograr un mayor aprovechamiento. Así, la orientación E-O únicamente se considera aconsejable en latitudes mayores a 40° (climas más fríos), siempre que los veranos no sean excesivamente calurosos, ya que en las fachadas O durante la tarde, el recalentamiento excesivo puede originar situaciones de gran discomfort térmico (Higueras, 2006).

En las calles con eje E-O, se generan fachadas orientadas al N y al S. La fachada S es la óptima para el invierno, como se apunta anteriormente, y también es bastante favorable para el verano, ya que no genera una alta demanda de refrigeración y, además, resulta más sencilla de proteger frente al soleamiento que las fachadas E y O. Sin embargo, la fachada N únicamente resultaría óptima para verano. En este caso, resolver la fachada N representa un reto, que pasaría por abrir dicha fachada al patio de manzana, volviendo así a generar una fachada a S, como ya se ha apuntado anteriormente. Otro aspecto a considerar en este caso es procurar diseñar adecuadamente el interior de las viviendas para que no haya ninguna sin abertura a las dos fachadas opuestas, N y S.

Por otro lado, según Higueras (2006) y Olgyay (1963), se recomienda orientar ligeramente la fachada hacia el E, considerada como la ideal para la zona templada, por recibir gran parte de la radiación de la mañana y menor porcentaje durante la tarde, cuando en verano el exceso de radiación resulta muy perjudicial. Concretamente, se aconseja un ángulo de unos 18°E. Sin embargo, este es un aspecto que debe verificarse previamente a asumir sus beneficios sin más, y tomar la importante decisión de cómo ordenar y planificar el viario urbano, como se verá más adelante.

Conclusión relativa a O:

En edificios sin obstáculos alrededor, la demanda energética de refrigeración evoluciona, según la orientación de su fachada principal, de menor a mayor, de la siguiente forma: N, S, E y O.

La configuración urbana del entorno modifica la influencia natural que la orientación suele tener, lo que demuestra la importancia del contexto urbano en el comportamiento energético del parque edificado.

6.3 PROPUESTA DE NUEVA CONFIGURACIÓN URBANA Y SU EVALUACIÓN ENERGÉTICA

El análisis realizado anteriormente sobre cada una de las covariables ha permitido establecer un conjunto de recomendaciones para el diseño del planeamiento urbano. Así, teniendo en cuenta todo lo anterior, se concluye que la manzana idónea para latitudes próximas a $39,98^\circ$ en el hemisferio Norte, debe reunir los siguientes condicionantes:

- El factor de forma del edificio (S/V) debe adoptar valores bajos (edificios más compactos).
- Las soluciones constructivas empleadas para el diseño de la envolvente deben tener valores bajos de transmitancia térmica (U).
- La ratio óptima de proporción de calle cumple una relación máxima de 0,50. Orientar la retícula de manzanas urbanas a SE permite reducir el ancho de calle (W) y, por tanto, propicia estructuras urbanas más compactas. Así, para edificaciones orientadas a 18°E , la relación máxima H/W podría aumentarse a 0,53.
- La tipología de manzana MU_1 es más apropiada, con patio de manzana grande en su interior, ya que permite abrir dos fachadas en los edificios orientadas a N-S. De esta manera, ningún edificio quedaría orientado completamente a N.
- La forma de las manzanas debe ser rectangular (manteniendo la proporción $A > 1,5B$, según la Figura 6.10) y su eje longitudinal debe desarrollarse en la directriz solar E-O, de manera que la mayor superficie de fachada quede orientada a S.
- Se recomienda orientar el eje de las calles en dirección E-O, de manera que el viario forme una retícula rectangular que favorezca orientar las fachadas de la mayoría de los edificios a N y a S.
- La orientación principal de los edificios a SE (con un ángulo de acimut 18°) es, a priori, mejor, aunque debe verificarse experimentalmente.
- Los edificios deben diseñarse de manera que cada una de las viviendas tenga dos fachadas en orientaciones opuestas, o bien S-N, o bien E-O.

Siguiendo estos criterios, se busca conformar la manzana urbana óptima, analizando el efecto de sus dimensiones y proporciones. Cada una de estas recomendaciones debe ser aplicada siguiendo un orden lógico en el diseño de los elementos del planeamiento urbano, desde la escala urbana a la de edificio. El procedimiento seguido para configurar la manzana urbana se muestra en la Figura 6.13.

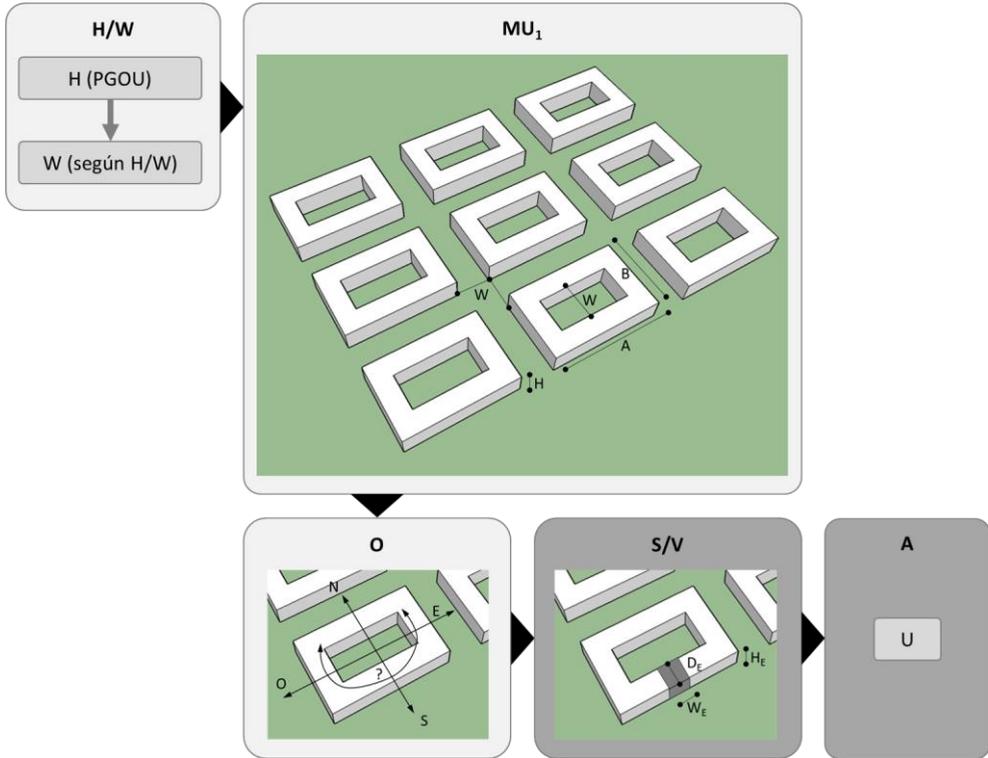


Figura 6.13 Procedimiento para definir la configuración urbana

Identificada la MU_1 como la tipología de manzana idónea, cabe tener en cuenta que el parámetro determinante que condiciona sus dimensiones es la altura de las edificaciones, dada por el número máximo de plantas permitido según el PGOU de la ciudad. Para conformar una manzana con patio interior que asegure el soleamiento en la fachada S de los edificios que recaen a él, la relación H/W también debe respetarse cuando se determina el ancho de manzana óptimo. La Tabla 6.2 presenta el resultado de analizar dos configuraciones de manzana, partiendo de los condicionantes del PGOU de Castellón de la Plana. En ella se presentan las ventajas e inconvenientes detectados en cada una de ellas.

Tabla 6.2 Estudio de dos diseños de manzana urbana

Crterios de diseo	Dimensiones	Ventajas	Inconvenientes
Opcin 1			
<ul style="list-style-type: none"> Se asumen los parmetros regulados segn el PGOU del barrio: <ul style="list-style-type: none"> - 8 plantas (24 m) - 20 m de profundidad edificacin H/W=0,53; W=45,30 m 	A= 128,00 m B= 85,30 m W= 45,30 m H= 24,00 m	<ul style="list-style-type: none"> No obstaculizacin de soleamiento por edificaciones enfrentadas. 	<ul style="list-style-type: none"> Ancho de calle excesivo (de 45,30 m, cuando las calles ms anchas de la ciudad tienen alrededor de 30 m) Dimensin de manzana excesiva para una ciudad de tamao medio, como Castelln. Genera dispersin de la ciudad. Baja compacidad, bajo aprovechamiento del suelo. Implica mayores desplazamientos de movilidad (tiempo y distancia). Menguan las relaciones sociales y la vitalidad econmica del barrio.
Opcin 2			
<ul style="list-style-type: none"> Se reduce la altura de edificacin a 6 plantas (18m) Se asume que las plantas bajas de los edificios son de uso terciario (mixtidad de usos) La profundidad de edificacin se fija en 16 m H/W=0,53; W=28,30 m 	A= 90,45 m B= 60,30 m W= 28,30 m H= 18,00 m	<ul style="list-style-type: none"> No obstaculizacin de soleamiento por edificaciones enfrentadas. Dimensiones prximas a la manzana tipo existente en el barrio, para lograr un aprovechamiento del suelo similar. Mayor compacidad y aprovechamiento del suelo. Menores desplazamientos. 	<ul style="list-style-type: none"> Ancho de calle (28,30 m) todava notable, aproximado al de las calles ms anchas de la ciudad.

La opcin 1 queda condicionada por la altura de 8 plantas (H=24 m) que establece el PGOU en el barrio, que para lograr que todas las fachadas a la calle no queden obstaculizadas solarmente por las edificaciones enfrentadas, obliga a prever un ancho de calle (W) de 45,30 m. De la misma manera, para garantizar esta misma condicin en las fachadas que recaen al patio interior de la manzana, la dimensin mnima del patio de manzana debera ser tambin de W=45,30 m, lo que hace agrandar en exceso las dimensiones totales de la manzana (A=128 m y B=85,30 m, similares a las del ensanche del Plan Cerdà (1859) de la ciudad de Barcelona). Por otro lado, el ancho de calle ptimo (45,30 m) genera demasiada separacin entre las manzanas, que comportara ciertos inconvenientes, como por ejemplo, una mayor dispersin urbana ligada a una menor compacidad y a un bajo aprovechamiento del suelo, mayores desplazamientos de movilidad al generarse distancias mayores, o una mengua en las relaciones sociales entre los vecinos al dispersarse la densidad de poblacin (habitantes/Ha). En este sentido, cabe recordar que se debe buscar el equilibrio con otros aspectos de la sostenibilidad urbana, pues, como se observa en la Tabla 3.2 del Captulo 3, la morfologa urbana est intimamente relacionada con los aspectos de "sitio y suelo" y "movilidad y transporte".

La opcin 2 busca reducir las dimensiones de la manzana, lo que implica necesariamente modificar el nmero de plantas mximo permitido por el PGOU a 6 (H=18 m). Adems, esta altura, referida a la altura donde es necesario garantizar el soleamiento, podra verse reducida si se asume que las plantas bajas de los edificios estn destinadas a usos terciarios. Por tanto, en este caso, habra que

garantizar el soleamiento en las 5 últimas plantas (H=15 m) de los edificios. Con ello, el ancho de calle podría reducirse hasta 28,30 m (W), al igual que la dimensión menor interior del patio de manzana. Este diseño genera manzanas de dimensiones menores, más en concordancia con el planeamiento del barrio y la envergadura de la ciudad, lo que no supondría modificar en exceso las condiciones de edificabilidad y compactad. Además, el ancho de calle de 28,30 m, aunque está por encima del ancho de calle medio de la ciudad, es asumible dentro de su PGOU.

De esta manera, a priori, la manzana propuesta en la opción 2 podría satisfacer las necesidades energéticas. Sin embargo, se verifica la condición de asegurar las dos horas de soleamiento durante el solsticio de invierno en las fachadas con radiación solar directa (E, S y O), teniendo en cuenta la obstrucción solar que provocan las edificaciones enfrentadas (ver Figura 6.14).

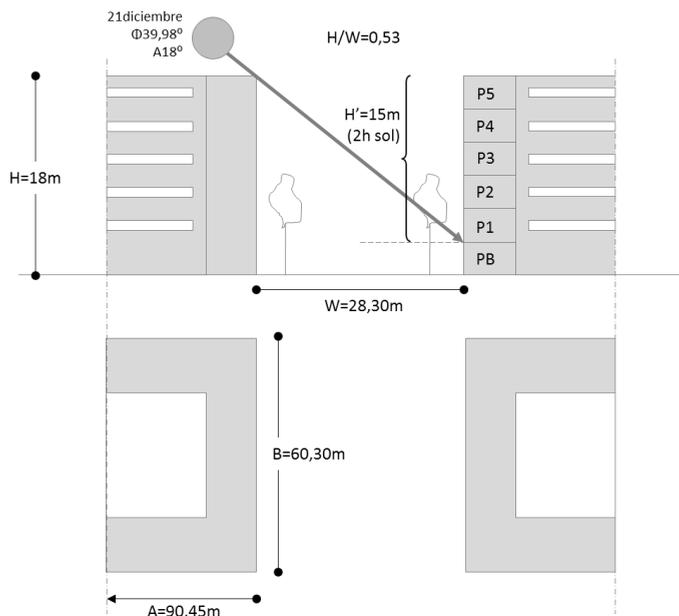


Figura 6.14 Configuración geométrica de la nueva manzana

Para ello, por un lado, se emplea la carta solar estereográfica para representar la máscara de sombra y determinar el intervalo de tiempo en el que la fachada recibe sol el solsticio de invierno. Y, por otro, mediante el cálculo analítico se determina la H/W en cada caso y con ello la W necesaria para garantizar el soleamiento en las tres fachadas. Cuando la W' calculada es menor que la W establecida (28,30 m), existe accesibilidad solar en la fachada analizada. Cabe indicar que los valores están calculados para el caso más desfavorable, que es el nivel de forjado suelo de planta primera, para garantizar el soleamiento en todas las plantas de uso residencial de los edificios. La Tabla 6.3 muestra los resultados del cálculo.

Tabla 6.3 Análisis del soleamiento en las fachadas S, E y O de la manzana en el solsticio de invierno

Máscara de sombra	Hora	h	A	A'	H/W	H'(m)	W'(m)	Observaciones
Fachada E								
	E 8:30h	10,26°	-47,32°	108°	0,37	15	40,58	Sin accesibilidad
	E 9:00h	14,26°	-41,61°	108°	0,63	15	23,63	2h de sol
	E 10:00h	20,89°	-28,98°	108°	2	15	7,48	
	E 10:30h	25,17°	-14,77°	108°	8,34	15	1,80	
Fachada S								
	S 8:00h	5,92°	-52,66°	18°	0,13	15	119,00	Sin accesibilidad
	S 9:00h	14,26°	-41,61°	18°	0,28	15	54,10	Sin accesibilidad
	S 10:00h	20,89°	-28,98°	18°	0,39	15	38,60	Sin accesibilidad
	S 11:00h	25,17°	-14,77°	18°	0,47	15	31,87	Sin accesibilidad
	S 12:00h	26,61°	0°	18°	0,53	15	28,30	2h de sol
	S 13:00h	25°	15,61°	18°	0,56	15	26,80	
	S 14:00h	20,57°	29,73°	18°	0,56	15	26,90	Sin accesibilidad
	S 15:00h	13,83°	42,28°	18°	0,49	15	30,20	Sin accesibilidad
S 16:00h	5,41°	53,34°	18°	0,29	15	50,68	Sin accesibilidad	
Fachada O								
	O 10:30h	23,36°	22,05°	72°	6,12	15	2,45	2,5h de sol
	O 11:00h	25,17°	14,77°	72°	8,34	15	1,80	
	O 12:00h	26,61°	0°	72°	1,62	15	9,25	
	O 13:00h	25°	-15,61°	72°	0,84	15	17,80	
	O 14:00h	20,57°	-29,73°	72°	0,51	15	29,60	Sin accesibilidad
	O 15:00h	13,83°	-42,28°	72°	0,28	15	52,91	Sin accesibilidad
	O 16:00h	5,41°	-53,34°	72°	0,10	15	150,00	Sin accesibilidad

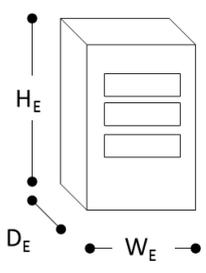
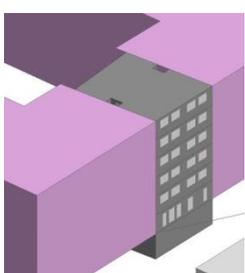
Como se observa en la Tabla 6.3, las tres fachadas (E, S, O) reciben al menos dos horas de sol, pues en las tres existe posibilidad de recibir radiación solar directa. Por tanto, la opción 2 sugerida podría mejorar a priori el comportamiento energético del barrio. Así, para asegurar soleamiento en una altura de H'=15 m, el ancho de la calle (W) debe de ser de 28,30 m, tanto en las calles con eje en dirección E-O como N-S.

Llegados a este punto, se realizan nuevas simulaciones para comprobar si efectivamente se producen mejoras en el comportamiento energético de los edificios que componen esta configuración urbana. Además, se pretende determinar cuál es la orientación óptima de las fachadas, teniendo en cuenta tanto la demanda de calefacción como la de refrigeración, por lo que los cálculos incluyen diversas orientaciones solares: 120°E, 45°O, 18°O, 0°S, 18°E, 45°E y 120°E.

Dado que la profundidad de edificación planteada es de 16 m, para lanzar las simulaciones se toma el edificio de referencia de la tipología edificatoria PF_(<4), por tener este 14,70 m de profundidad y encajar así en la geometría de la manzana. Se realizan algunas modificaciones sobre el mismo, pues la altura de planta existente es de 4,50 m, al tratarse de una edificación antigua. Esta altura es poco habitual en edificaciones actuales, en las que predominan los 3 m. Así, se configura un edificio de PB+V (con una planta sótano, no habitable), con la misma distribución de la planta tipo y la planta baja destinada completamente a uso terciario (por lo que no se computa en los cálculos térmicos), que representaría a la nueva tipología edificatoria a considerar en el planeamiento urbano. La planta tipo está constituida por dos viviendas y cada una de ellas tiene dos fachadas, una a la calle y otra al

patio de manzana, de manera que tienen orientaciones opuestas. El edificio resultante tiene las características que se detallan en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4 Características dimensionales del edificio tomado como referencia

Propiedades	Edificio de referencia
	
Ocupación	PF
S/V (m^{-1})	0,28
Plantas sobre rasante	6 (5 uso residencial)
H_E Altura (m)	18,00
W_E Anchura (m)	11,80
D_E Profundidad (m)	14,70
Superficie habitable (m^2)	720,97
Volumen habitable (m^3)	2.000,52
Superficie envolvente (m^2)	558,37
Sup. elementos opacos (m^2)	349,1
Sup. acristalada (m^2)	136,8
% Acristalamiento	31,20

El factor de forma (S/V) del edificio ficticio es de 0,28, muy próximo al S/V del edificio representativo de clase $PF_{(\geq 4)}$ (0,26), por lo que el edificio tomado como referencia en este caso es compacto y susceptible de tener una baja demanda energética de calefacción. El porcentaje de huecos o superficie acristalada es de 31,20%, en torno al de los edificios seleccionados para desarrollar el modelo. Para realizar las simulaciones, no se han tenido en cuenta las protecciones solares del propio edificio.

Puesto que las recomendaciones obtenidas son para nuevas planificaciones urbanas, se toma como referencia el periodo temporal 5, que aglutina el paquete de soluciones constructivas más recientes. Podrían tomarse los nuevos requisitos establecidos en el CTE (2013), sin embargo este no establece unos requisitos mínimos de aislamiento térmico, sino que limita la demanda energética de calefacción y refrigeración, lo que otorga cierta libertad a la hora de cumplir las exigencias, pero también hace que los espesores de aislamiento térmico no puedan estandarizarse para la diversa casuística.

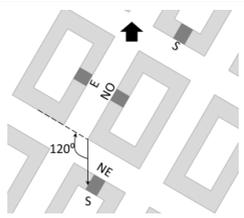
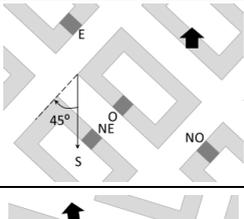
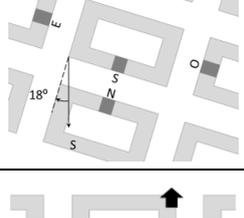
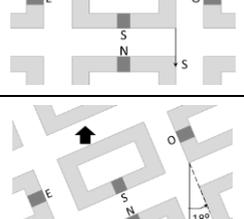
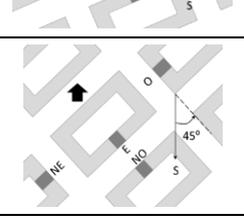
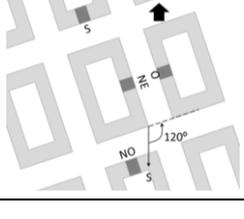
Se plantean siete opciones:

- La opción 1, contempla una orientación de la manzana en el eje SO-NE formando la normal de la fachada un ángulo de 120°O.
- La opción 2, contempla una orientación de la manzana en el eje NO-SE formando la normal de la fachada un ángulo de 45°O.

- La opción 3, contempla la orientación de la manzana en el eje NO-SE formando la normal de la fachada un ángulo de 18° O.
- La opción 4, contempla la orientación de la manzana en el eje O-E, perfectamente orientadas al S.
- La opción 5, contempla la orientación de la manzana en el eje SO-NE formando un ángulo de 18° E.
- La opción 6, contempla la orientación de la manzana en el eje SO-NE formando un ángulo de 45° E.
- La opción 7, contempla la orientación de la manzana en el eje SE-NO formando un ángulo de 120° E.

Cada una de estas 7 opciones genera cuatro orientaciones diferentes de fachada, lo que da como resultado un total de 28 hipótesis, como se define en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5 Determinación de indicadores para las diferentes orientaciones de la manzana

	Definición gráfica	O. fach.ppal.	DE, [kWh/m ² año]	DE _c [kWh/m ² año]	HD _v [h/año]	HD _i [h/año]
1		NO (120°O)	9,75	42,49	100,95	4.207,42
		NE (150°E)	5,42	38,29	188,16	3.966,49
		E (60°E)	10,19	40,14	99,16	4.100,03
		S (30°O)	5,49	39,27	196,25	4.027,31
2		NO (135°O)	6,80	38,79	168,08	4.062,89
		NE (135°E)	7,70	41,18	138,05	4.159,91
		E (45°E)	7,23	39,53	162,14	4.090,85
		O (45°O)	7,94	40,66	136,35	4.101,56
3		N (162°E)	4,12	37,14	225,11	4.031,54
		E (72°E)	11,97	43,13	85,16	4.108,54
		S (18°O)	4,62	35,85	223,61	3.965,72
		O (108°O)	10,88	44,01	91,19	4.142,44
4		N (180°N)	3,86	36,73	234,89	4.027,00
		E (90°E)	12,69	42,901	84,49	4.047,23
		S (0°S)	4,03	35,05	237,14	3.939,15
		O (90°O)	11,79	44,43	84,33	4.161,17
5		N (162°O)	4,70	38,24	211,23	4.121,29
		E (108°E)	10,78	41,92	98,29	4.018,83
		S (18°E)	4,68	36,36	212,16	4.034,84
		O (72°O)	10,39	44,27	92,50	4.187,52
6		NO (135°O)	7,97	40,98	137,44	4.190,41
		NE (135°E)	6,93	39,12	163,82	3.970,51
		E (45°E)	8,26	38,92	131,60	4.123,16
		O (45°O)	7,18	41,32	162,07	4.087,68
7		NO (150°O)	6,14	39,63	176,25	4.087,54
		NE (120°E)	8,88	39,56	124,02	4.068,93
		S (30°E)	5,48	39,60	187,05	4.126,71
		O (60°O)	8,85	41,21	123,35	4.147,35

La comparación entre los resultados de estas 28 simulaciones permite identificar la orientación óptima. Con dichos resultados se elabora un gráfico donde quedan representadas las demandas de calefacción y de refrigeración en cada una de las orientaciones de la fachada principal del edificio (ver Figura 6.15). Se observa que los mínimos valores de DE_c se dan en las orientaciones S y N y los máximos en las E y O. Con la demanda de refrigeración ocurre precisamente al contrario, los valores máximos de DE_r se dan en las orientaciones E y O y los mínimos en las N y S. Por ello, orientar el eje longitudinal de las manzanas en dirección E-O (ver Figura 6.10) generaría la mayor parte de la superficie de las fachadas en la orientación favorable N y S, donde se producen las mínimas DE_c y DE_r , pero las otras dos fachadas quedarían orientadas en la peor orientación, E y O, donde precisamente se producen los valores máximos de DE_c y DE_r . Por este motivo, es conveniente buscar la orientación óptima, en la que los valores estén más compensados. En el gráfico de la Figura 6.15, se observa que este óptimo se da en un rango de orientaciones comprendido entre $18^\circ E$ y $45^\circ E$, lo que genera fachadas opuestas en el rango $135^\circ O$ y $162^\circ O$. En dichos rangos, se registran valores bajos de DE_c , al mismo tiempo que los valores de DE_r son aceptables. Puede, por ello, considerarse esta franja (opción 5) como la orientación óptima en la que diseñar las manzanas urbanas, delimitadas por la retícula del viario público, corroborándose la hipótesis planteada por Olgyay (1963).

Su rango simétrico, el comprendido entre $18^\circ O$ y $45^\circ O$, podría resultar también favorable. Sin embargo, la radiación solar de la mañana es más soportable que la de la tarde, como consecuencia del recalentamiento de la atmósfera.

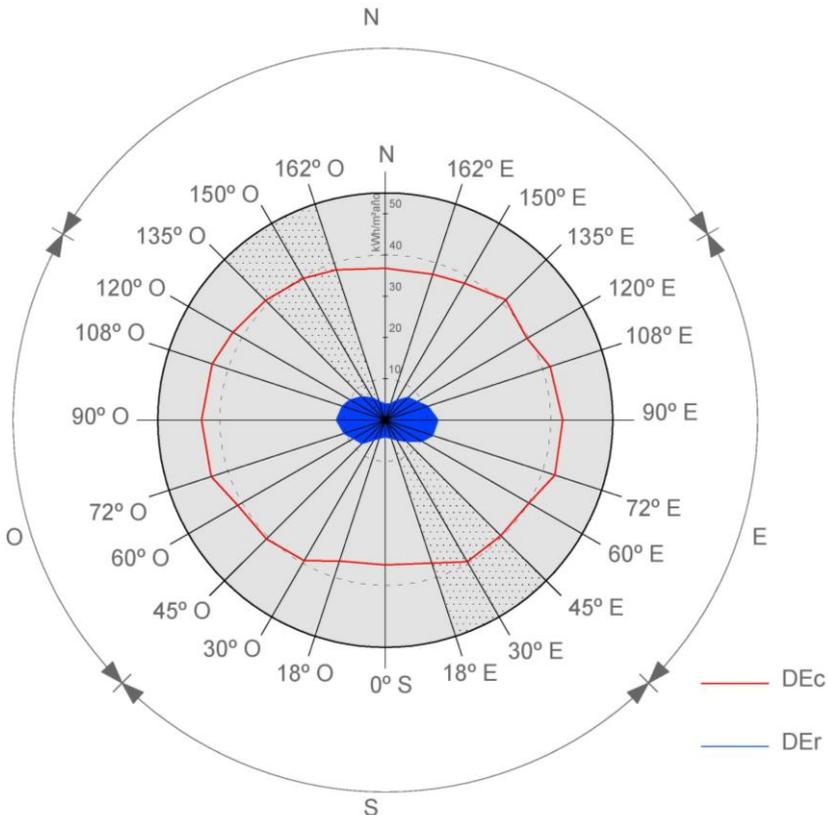


Figura 6.15 Gráfico de relación entre la demanda energética y la orientación. Orientación óptima

La Figura 6.16 muestra el soleamiento en el solsticio de invierno en las cuatro orientaciones que genera la manzana urbana propuesta.

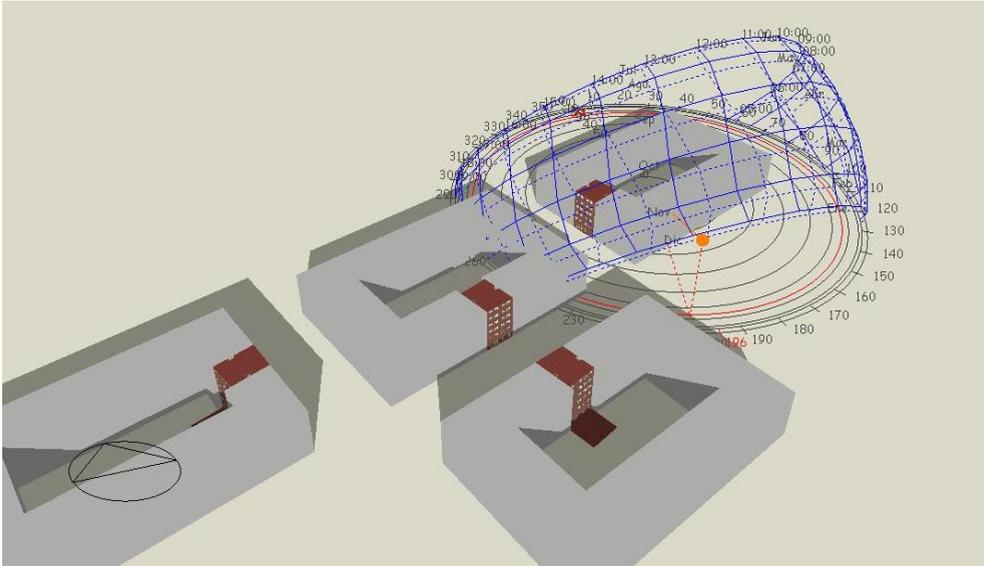


Figura 6.16 Soleamiento en la orientación de manzana óptima (solsticio invierno)

Evaluación energética de un área urbana con la configuración propuesta

Para determinar el ahorro energético que supondría la ordenación urbana de nuevos desarrollos con la morfología urbana propuesta, se toma la superficie del barrio (17,6 Ha) y se desarrolla en dicha superficie la planificación urbana propuesta. Para obtener manzanas enteras se necesita una superficie algo mayor (18,4 Ha), que posteriormente se corregirá con los valores de demanda energética. La Figura 6.17, muestra cómo quedaría la configuración urbana de un nuevo barrio tras aplicar las directrices aquí expuestas.

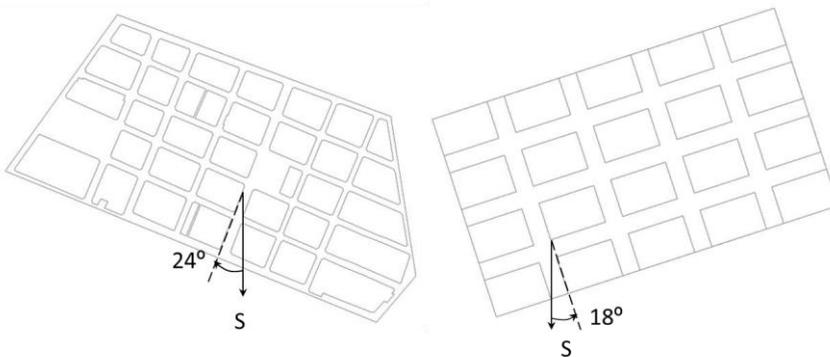


Figura 6.17 Configuración urbana existente (izquierda) y propuesta (derecha)

Cada una de las manzanas urbanas que componen el área, quedaría configuradas de la forma que se muestra en la Figura 6.18. Así, siete de los edificios quedaría orientados a N (su fachada principal), siete a S, tres a E y tres a O.

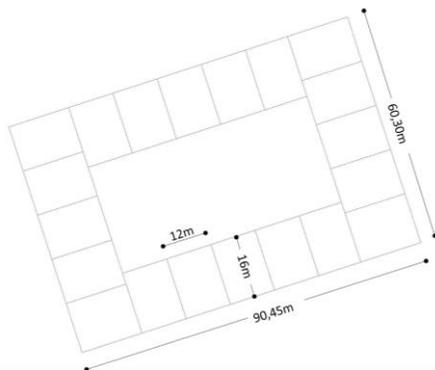


Figura 6.18 Configuración de las edificaciones en la manzana urbana propuesta

Con el total de las 20 manzanas, que se comportan energéticamente de la misma forma, se pueden determinar los cuatro indicadores energéticos. El cálculo se realiza para el total de las 20 manzanas (18,4 Ha) y después se realiza la conversión para una superficie de 17,6 Ha, igual a la del barrio del caso de estudio (Tabla 6.6), para poder realizar la comparativa.

Tabla 6.6 Cálculo de los indicadores energéticos en la planificación urbana propuesta

Nº manzanas	Nº Edificios	O	Sup. construida. residencial (m ²)	Sup. Total. (m ²)	DE _r (kWh/m ²)	DE _r (kWh/año)	DE _c (kWh/m ²)	DE _c (kWh/año)	HD _r (horas/año -edificio)	HD _c (horas/año -edificio)
20	7	N	720,97	100.935,8	3,17	319.966,49	42,88	4.328.127,10	211,23	4.121,29
20	7	S	720,97	100.935,8	3,02	304.826,12	41,64	4.202.966,71	212,16	4.034,84
20	3	E	720,97	43.258,2	5,87	253.925,63	42,17	1.824.198,29	98,29	4.018,83
20	3	O	720,97	43.258,2	5,64	243.976,25	44,33	1.917.636,00	92,50	4.187,52
En 18,4 Ha			288.388,0			1.122.694,50		12.272.928,12		
En 17,6 Ha			275.849,4			1.073.881,68		11.739.322,55		

Con ello se obtiene un total de 1.073,88 MWh/año de demanda de refrigeración y 11.739,32 MWh/año de demanda de calefacción. En la Tabla 6.7 se muestra la comparativa con la situación actual, de manera que se estima una reducción de la demanda energética de calefacción del 60,01%. La demanda de refrigeración, sin embargo, sufre un significativo aumento del 205,13%. En la situación existente, al ser las calles estrechas, en verano apenas accede el sol a las fachadas de los edificios, por lo que la demanda de refrigeración es muy baja o, en algunos casos, prácticamente inexistente. Sin embargo, ello conlleva una importante penalización en la demanda energética de calefacción. Por este motivo, la consiguiente disminución de la demanda de calefacción en la nueva situación propuesta, compensa con creces el aumento en la demanda de refrigeración, pues entre ambas, se lograría aun así, una reducción de la demanda energética global del 57,12%, valor muy

significativo. Ello demuestra, una vez más, la importancia que tiene la morfología urbana en el comportamiento energético del parque edificado.

Tabla 6.7 Comparativa entre configuración existente y propuesta para una superficie de referencia de 17,6 Ha

	Barrio existente	Nueva planificación	Variación (%)
Sup. Construida (m²)	313.301,00	275.849,4	-11,95%
DE_r (MWh/año)	523,53	1.073,88	205,13%
DE_c (MWh/año)	29.354,89	11.739,32	-60,01%
DE_g* (MWh/año)	29.878,42	12.813,20	-57,12%

*DE_g: Demanda energética global

Además de las estrategias ya descritas anteriormente en relación a las cinco covariables, se pueden emplear otras estrategias que contribuyan a corregir picos de demanda energética y situaciones de discomfort térmico, como por ejemplo, emplear una correcta distribución de los espacios dentro de las viviendas para captar o evitar la radiación solar (según el uso de mismos), la utilización de protecciones solares y la realización de actuaciones sobre las soluciones constructivas de la envolvente térmica del edificio. Entre ellas, destaca el importante papel que tiene el uso de protecciones solares correctamente diseñadas, las cuales contribuyen a reducir considerablemente la demanda de refrigeración en el periodo estival, cuando estas están operativas. Pero, sin embargo, consiguen no afectar negativamente a la demanda de calefacción durante el periodo invernal. La consideración de estas en los edificios del barrio puede corregir, por tanto, el aumento en la demanda de refrigeración en el periodo estival.

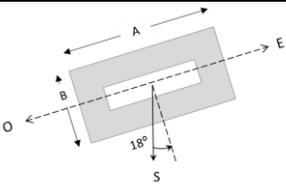
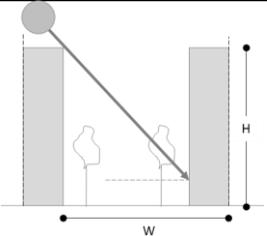
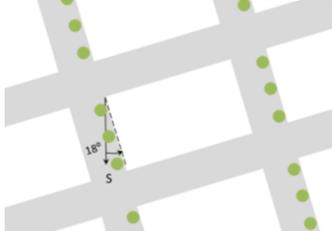
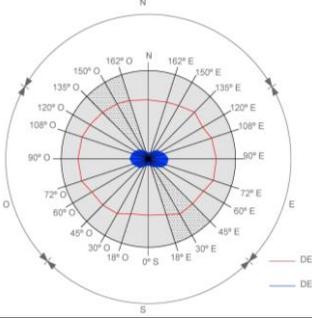
Estas consideraciones, tienen un papel muy importante en el diseño bioclimático o pasivo de los edificios, por lo que no pueden obviarse tanto en las nuevas planificaciones urbanas como en los tejidos urbanos ya consolidados. Sin embargo, estas no constituyen directrices geométricas ni dimensionales que afecten al diseño urbano ni a la geometría del edificio. Así, deben ser estudiadas a nivel de edificio y requieren de un estudio en profundidad, que queda fuera del alcance del presente trabajo.

6.4 RELACIÓN DE ESTRATEGIAS PASIVAS PARA MEJORAR EL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DEL PARQUE EDIFICATORIO RESIDENCIAL

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente expuesto, la Tabla 6.8 resume el conjunto de estrategias pasivas, tanto a escala urbana como de edificio, que pueden ser consideradas para mejorar el comportamiento energético pasivo del parque edificatorio residencial.

Todas ellas sirven como directrices para el desarrollo de nuevas planificaciones urbanas. En el supuesto de tejidos urbanos consolidados, las posibilidades de actuar sobre el mismo son escasas, por lo que las medidas a considerar pueden ser, prácticamente, implementadas únicamente a nivel de edificio.

Tabla 6.8 Estrategias pasivas para mejorar el comportamiento energético del parque edificatorio residencial

Escala	Covariable	Descripción
Urbana	MU	 <ul style="list-style-type: none"> • Patio de manzana • Edificios y viviendas con dos fachadas opuestas • Forma rectangular de manzana en dirección E-O con proporción $A > 1,5B$
	H/W	 <ul style="list-style-type: none"> • Proporción $H/W \leq 0,53$
	O	 <ul style="list-style-type: none"> • Orientación del viario $72^\circ O - 108^\circ E$ • Mayor % de edificios orientados a N-S • Disposición de vegetación de hoja caduca en aceras E (como protección solar de fachadas O) (*¹)
Edificio	O	 <ul style="list-style-type: none"> • Orientación del lado mayor de la manzana urbana $18^\circ E$
	S/V	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo factor de forma

Obviamente, a nivel de edificio existen muchas otras estrategias que podrían implementarse, como se ha comentado anteriormente. Por ejemplo, en relación a los huecos, la colocación de una doble ventana puede mejorar notablemente el comportamiento energético de los edificios, al reducir infiltraciones y proporcionar mayor aislamiento térmico. O, en relación a los elementos opacos, estudiar las posibilidades que ofrece cada cerramiento para incorporar aislamiento térmico. Por otro lado, pueden adoptarse otras estrategias activas de acondicionamiento como la sustitución de equipos térmicos antiguos de baja eficiencia o la integración de energías renovables. Probablemente, en tramas urbanas consolidadas, se deba ejercer una fuerte apuesta por las medidas activas, ya que la implementación de medidas pasivas está fuertemente limitada, al no poder modificarse los condicionantes geométricos del urbanismo. No obstante, las estrategias

activas no tendrían ningún efecto positivo sobre la demanda energética, sino que contribuirían a paliar el consumo final de energía en el parque edificatorio, no pudiendo evitarlo en su totalidad, como sí se puede conseguir por medio de un buen diseño pasivo. Sin embargo, no es objeto del presente trabajo investigar medidas de eficiencia energética en los edificios, pues este resulta un amplio campo de estudio que merece, por sí solo, un análisis en profundidad.

6.5 CONCLUSIÓN

El presente capítulo realiza un análisis y discusión de los resultados del diagnóstico energético del barrio objeto de estudio en el Capítulo 5, el cual permite determinar ciertas recomendaciones que podrían tenerse en cuenta a la hora de llevar a cabo actuaciones de renovación urbana, en relación a las cinco covariables. A su vez, propone una nueva configuración urbana que podría ser considerada a la hora de elaborar las ordenanzas urbanísticas de un nuevo planeamiento urbano en la ciudad. La comparativa entre ambas situaciones, la actual y la propuesta, contribuye a validar la hipótesis sobre la importancia de la morfología urbana en el comportamiento energético del parque edificatorio.

Como demuestran los resultados comparativos sobre demanda energética entre el tejido actual del barrio y el nuevo tejido propuesto, cuando se apuesta por un adecuado diseño urbano, el potencial de ahorro es muy alto, y pueden alcanzarse reducciones del 57,12%. Este dato puede considerarse muy positivo, más aún teniendo en cuenta que puede lograrse únicamente mediante el diseño pasivo, sin necesidad de recurrir a los sistemas activos de acondicionamiento. La reducción de la demanda energética necesaria para cumplir con los nuevos estándares establecidos por el nuevo CTE (2013), fijados entorno a los 15 kWh/m²-año tanto para calefacción como para refrigeración en una zona climática B3, puede conseguirse mediante la actuación sobre la envolvente térmica de los edificios y la adecuada resolución de los puentes térmicos.

Como se menciona anteriormente, la intervención sobre tejidos urbanos ya existentes, sin embargo, resulta muy compleja, pues la configuración de estos no puede ser modificada. Por ello, en estos casos resulta crucial disponer de los instrumentos que permitan realizar un diagnóstico energético para estudiar, a posteriori, posibles mejoras y evaluar cuantitativamente su potencial de ahorro. Tras conocer el diagnóstico energético del área urbana en la que se desee intervenir, las acciones a llevar a cabo deberán basarse principalmente en actuaciones sobre los propios edificios, y basarse tanto en medidas pasivas como activas. Ello supone un amplio campo de estudio, de interesante consideración para futuros desarrollos.

Por último, mencionar que las administraciones locales cobran especial importancia en este sentido y adoptan un papel estratégico para integrar criterios de eficiencia energética en las ordenanzas municipales y, además, regular y priorizar las actuaciones de rehabilitación, ahora ya amparadas y fomentadas por la legislación a través de la Ley 3R sobre rehabilitación, regeneración y renovación urbanas (Gobierno de España, 2013). Por ello, el grado de compromiso que la administración asuma será clave para lograr construir y reconstruir nuestras ciudades siguiendo unas directrices adecuadas en el camino hacia la sostenibilidad urbana y la eficiencia energética.

6.6 REFERENCIAS

Casanova, M., Díaz-Palacios, S., Elizalde, J., Garachana, R., Gil, J., Higuera, E., 2003. Ordenanza Municipal de Urbanización y Edificación Bioclimática. España.

- Cerdà, I., 1859. Teoría de la construcción de las ciudades. Aplicada al proyecto de reforma y ensanche de Barcelona. Barcelona.
- CTE, 2013. Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, por la que se actualiza el Documento Básico DB-HE Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación, aprobado por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo. España.
- CTE, 2006. Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. España.
- Gobierno de España, 2013. Ley 8/2013, de 26 de junio, de rehabilitación, regeneración y renovación urbanas. España.
- Granados, H., 2006. Principios y estrategias del diseño bioclimático en la arquitectura y el urbanismo. Eficiencia energética. Madrid.
- Higueras, E., 2006. Urbanismo bioclimático ISBN: 978-84-252-2071-5. Gustavo Gili, Barcelona.
- Matusiak, M., 2016. SolarBeam software.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010. Sistema de indicadores y condicionantes para ciudades grandes y medianas.
- Ministerio de Vivienda del Gobierno de España, 2010. Libro Blanco de la Sostenibilidad en el Planeamiento Urbanístico Español. Madrid.
- NBE-CT-79, 1979. Real Decreto. Norma Básica de la Edificación sobre condiciones térmicas en los edificios. España.
- Olgay, V., 1963. Design With Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism. Princeton University Press, Princeton.



7. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

Propuesta **metodológica** para la caracterización del **comportamiento energético pasivo** del parque edificatorio **residencial** existente considerando su contexto **urbano**.

7.1 CONCLUSIONES

La propuesta metodológica expuesta en esta tesis constituye una herramienta de diagnóstico energético del parque edificatorio residencial existente en tejidos urbanos consolidados. Tras desarrollar el trabajo, se extrae un conjunto de conclusiones que se presentan a continuación, de forma general y según cada uno de los objetivos planteados al inicio de la investigación.

Conclusiones generales

- El auge en el sector de la edificación residencial tuvo lugar en los años previos a la introducción de normativa relativa a la eficiencia energética en los edificios. Este hecho deja como legado un extenso parque de edificios residenciales obsoleto con respecto a los estándares actuales sobre ahorro y consumo de energía, que requiere ser intervenido y rehabilitado energéticamente.
- El marco normativo actual, además de fijar su mirada en la ciudad consolidada, otorga a las administraciones locales un papel estratégico para llevar a cabo las actuaciones de rehabilitación edificatoria y de renovación urbana. El grado de compromiso que la administración asuma será clave para lograr el éxito de estos procesos, pero también existe la necesidad de dotar a la administración de herramientas que faciliten la identificación de las áreas urbanas energéticamente más vulnerables y la implementación de actuaciones.
- A pesar de que existen metodologías ya desarrolladas para evaluar energéticamente el parque edificatorio, ninguna de ellas satisface por completo el conjunto de requisitos identificados como necesarios a integrar por una metodología de evaluación energética.
- La metodología propuesta ofrece versatilidad, pues permite la incorporación de nuevas covariables, que podrían ser integradas en las ecuaciones de predicción con el fin de investigar otros aspectos de la morfología urbana o del edificio, y la relación de estos con el comportamiento energético del parque edificado.
- El enfoque urbano de la metodología trata el aspecto energético desde una perspectiva global e integradora, de manera que los indicadores energéticos desarrollados podrían ser incorporados a una herramienta de evaluación de la sostenibilidad urbana (HESU) para evaluar el aspecto energético como parte integrante de la sostenibilidad urbana.

Conclusiones relativas al Objetivo 1

Conocer el estado del arte sobre cada una de las temáticas que se abordan en la tesis

- La normativa relacionada con la eficiencia energética de los edificios está en constante evolución y concede progresivamente más importancia a los aspectos pasivos que afectan al comportamiento energético del parque edificatorio.
- Una HESU debe ser adaptable a las características del entorno en el cual se implementa y reflejar y evaluar con objetividad las particularidades que lo definen, tanto en lo que se refiere a los aspectos físicos como al contexto socio-económico.
- Es recomendable que los indicadores propuestos por una HESU sean cuantitativos, de manera que evalúen, a través de una escala de puntuación, el nivel de cumplimiento de las exigencias

establecidas por cada indicador. Integrar un método de ponderación que relacione el peso de cada indicador con el resto, también contribuye a aumentar la objetividad de la herramienta.

- En una metodología de evaluación energética, el enfoque *bottom-up* es el adecuado cuando el objetivo de la misma es evaluar el comportamiento energético de un parque edificatorio con precisión. En la metodología propuesta se adopta este enfoque, el cual permite evaluar una muestra representativa de edificios y extrapolar las conclusiones a una escala urbana.
- El procedimiento de cálculo adecuado para llevar a cabo la evaluación energética de edificios, con un nivel alto de precisión, es la simulación dinámica.

Conclusiones relativas al Objetivo 2

Identificar un conjunto de variables que permitan evaluar el comportamiento energético pasivo del parque edificatorio residencial existente

- Los aspectos ambientales son los que más atención reciben por las HESU y, dentro de estos, aquellos relacionados con la energía adquieren un papel relevante, posicionándose en el tercer lugar de los aspectos más tratados.
- Las metodologías de evaluación energética desarrolladas hasta la fecha consideran ampliamente los aspectos pasivos relacionados con el edificio. Sin embargo, los aspectos relacionados con la morfología urbana quedan relegados a un segundo plano, siendo sistemáticamente obviados.
- La relevancia que la categoría “morfología urbana” adquiere en las HESU, no obstante, es muy significativa, posicionándola en el primer lugar de los aspectos más tratados por los indicadores. Como demuestra la revisión, esta guarda una íntima relación con otras categorías, entre las que destacan “energía” y “edificación y vivienda”. La estrecha relación entre estos tres aspectos denota la importancia de la morfología urbana para alcanzar la sostenibilidad urbana y demuestra también que esta no debe ser obviada al evaluar energéticamente un parque edificatorio. Como consecuencia de ello, la morfología urbana es uno de los aspectos integrantes en la metodología propuesta, a través de las covariables MU, H/W y O.
- Existe un amplio consenso entre las metodologías analizadas en que los aspectos del edificio que están relacionados con su comportamiento pasivo son la compacidad, definida a través del factor de forma (S/V), y la transmitancia térmica de la envolvente, definida a través del año de construcción (A). Ambos aspectos son integrados en la metodología propuesta como covariables relacionadas con el edificio. Como se deriva del Anexo III Análisis detallado de la demanda de refrigeración, la inercia térmica tiene una importancia relevante en el comportamiento energético de los edificios, influyendo en el desfase térmico y la amortiguación de onda térmica del cerramiento. Así, en el caso de soluciones constructivas antiguas, la elevada inercia térmica de los cerramientos contribuye a mantener la temperatura operativa interior del edificio alrededor de la temperatura de consigna de verano. Ello impide que las temperaturas altas exteriores se transfieran hacia el interior del edificio, evitando situaciones de disconfort y haciendo prácticamente nula la demanda de refrigeración. Por ello, además de la covariable A, que considera las propiedades térmicas estáticas, podría tenerse en cuenta en futuros desarrollos de la metodología la integración de la inercia térmica, como propiedad dinámica de la envolvente térmica.
- Se seleccionan como indicadores energéticos de evaluación pasiva (o variables respuesta) la demanda energética de refrigeración (DE_r) y de calefacción (DE_c) y las horas de disconfort en verano (HD_v) e invierno (HD_i).

Conclusiones relativas al Objetivo 3

Proponer un procedimiento para caracterizar el parque residencial de edificios de un entorno urbano consolidado e identificar la taxonomía urbana representativa

- El procedimiento definido para la caracterización del parque edificatorio residencial existente permite la identificación de manzanas urbanas por un lado, y de tipologías edificatorias por otro, lo que conduce a obtener la taxonomía urbana representativa del área objeto de estudio. Ello tiene como finalidad la simplificación del proceso de evaluación energética, pues únicamente será necesario modelar una muestra representativa de edificios, cuyos resultados pueden ser extrapolados a la escala urbana.
- El desarrollo de esta caracterización en un entorno SIG facilita el proceso y permite crear una base de datos georreferenciada que servirá también para representar los resultados del diagnóstico energético en mapas urbanos energéticos.

Conclusiones relativas al Objetivo 4

Desarrollar un modelo de predicción, basado en los métodos empírico y estadístico, que permita estimar, a escala urbana, el comportamiento energético de los edificios, a través de los indicadores y covariables previamente identificados

- Dentro del enfoque *bottom-up*, la técnica experimental (o de ingeniería) permite definir detalladamente los parámetros de cálculo durante la simulación energética y considerar todas las covariables seleccionadas. En particular, la simulación dinámica permite desglosar de una forma pormenorizada la demanda energética del edificio (en calefacción y refrigeración) y conocer las horas de desconfort en cada momento a lo largo de todo un año tipo. Además, permite estimar otros parámetros relevantes como son la distribución de temperaturas, el balance térmico y las pérdidas energéticas a través de cada tipo de cerramiento, lo que posibilita indagar en las causas que provocan ciertos comportamientos. La evaluación energética se realiza sobre una muestra de edificios representativos seleccionados según los criterios establecidos en la metodología, lo que permite simplificar el proceso de evaluación energética. Se simula un conjunto de hipótesis que reflejan la realidad urbana, planteadas por combinación de todas las covariables, de manera que se obtiene un extenso conjunto de resultados que serán tratados estadísticamente.
- En combinación con la técnica experimental, la técnica estadística permite modelizar los datos extraídos del análisis energético y obtener un conjunto de ecuaciones de predicción de los indicadores energéticos, DE_r , DE_c , HD_v y HD_i , teniendo en cuenta el efecto de cada una de las covariables integradas en las ecuaciones.
- El método de predicción utilizado en la metodología para realizar la evaluación a escala urbana constituye su mayor novedad, puesto que este no se basa en la mera extrapolación de los resultados de evaluar un conjunto de edificios representativos a todos los edificios de su misma tipología, como proponen la mayoría de metodologías existentes. En la metodología aquí propuesta, además de considerar las covariables a nivel de edificio, se tienen en cuenta covariables relativas al entorno urbano que también condicionan el comportamiento energético del parque edificatorio residencial (MU, H/W y O). Considerando estos aspectos, los cuatro indicadores energéticos son determinados de forma individual para cada edificio incluido en el área de estudio, según el valor que adoptan las covariables que estos llevan asociadas.

- El modelo permite ampliar el número de covariables, de manera que podrían incorporarse otros aspectos que sean susceptibles de influir en el comportamiento energético pasivo del parque edificatorio residencial.

Conclusiones relativas al Objetivo 5

Proponer un procedimiento que permita representar los resultados de implementar la metodología en mapas urbanos energéticos

- El nivel de implementación de la tecnología SIG es todavía bajo entre las metodologías existentes en la literatura. Sin embargo, el desarrollo de la metodología propuesta en un entorno SIG, tal y como queda demostrado en el caso de aplicación, facilita el tratamiento de un gran volumen de información y permite generar mapas urbanos energéticos para identificar con claridad las áreas urbanas con mayor vulnerabilidad energética. Ello pone a disposición del usuario una interfaz visual para representar los resultados de implementar la metodología.

Conclusiones relativas al Objetivo 6

Implementar la metodología propuesta en un caso de aplicación

Como resultado de implementar la metodología en el barrio propuesto de Castellón de la Plana, se extraen las siguientes conclusiones:

- La inclusión de todas las covariables identificadas contribuye a mejorar el modelo de predicción. Se identifica que todas las variables son significativas, lo que refleja la pertinencia de incluir todas ellas en las cuatro ecuaciones de predicción obtenidas tras la modelización estadística. No obstante, se identifica que no todas las covariables son significativas al mismo nivel, por lo que unas tienen más influencia que otras sobre el comportamiento energético pasivo del parque edificatorio residencial. Así, las covariables se muestran significativas en el siguiente orden: S/V, A y H/W por igual, MU, O.
- En relación al factor de forma del edificio, esta se presenta como la covariable más significativa del modelo. Valores bajos de S/V (edificios más compactos) llevan asociada una menor demanda energética de calefacción, aunque incrementan ligeramente la demanda de refrigeración. A pesar de ello, es recomendable el diseño de edificios con un bajo factor de forma.
- En relación al año de construcción (A), los edificios de construcción más reciente presentan una menor demanda de calefacción, obviamente propiciada por las mejores prestaciones de su envolvente térmica, pero en contraposición presentan una peor demanda de refrigeración. La gran inercia térmica de las fachadas de los edificios antiguos favorece la amortiguación del paso de calor, reduciendo así la demanda energética en el periodo estival, particularmente, en edificios construidos con anterioridad a 1940, cuyas fachadas estaban constituidas mayoritariamente por muros de carga.
- En relación a la proporción de calle, ratios altas H/W implican menor demanda de refrigeración, pero también mayor demanda de calefacción. Puesto que la demanda de calefacción en el barrio es la más relevante, conviene diseñar entornos urbanos con una relación H/W máxima de 0,53, para evitar que los edificios enfrentados generen sombras y perjudiquen la demanda de calefacción, incrementándola. La corrección de la demanda de refrigeración en el periodo estival es menos crítica, pues el exceso de radiación solar puede controlarse a través de la disposición de protecciones solares que contribuyen a reducir dicha demanda.

- En relación a la tipología de manzana urbana, la MU₁, la cual integra un gran patio de manzana, resulta la más favorable, pues comporta un mejor confort térmico para los ocupantes de los edificios tanto en verano como en invierno.
- En relación a la orientación (O), las simulaciones realizadas adicionalmente demuestran que la morfología urbana puede modificar enormemente el efecto natural de las orientaciones, pudiendo llegar a ser muy perjudicial en la demanda energética y el confort térmico. Por ello, conviene respetar una relación H/W baja y diseñar manzanas urbanas con patios de manzana (MU₁) que garanticen soleamiento en dos de las fachadas de los edificios con orientaciones opuestas, lo que hace mejorar considerablemente su comportamiento energético. Por otro lado, conviene diseñar el eje de las calles en dirección E-O y orientar el lado de mayor dimensión de la geometría rectangular de la manzana a S. La orientación óptima de la normal de las fachadas resulta en un ángulo de 18°E, con respecto a S.
- El desarrollo de mapas urbanos energéticos permite visualizar con claridad aquellos conjuntos edificatorios del barrio que más energía requieren para alcanzar las condiciones óptimas de confort térmico. Precisamente, ellos coinciden con las manzanas urbanas más antiguas.
- Reducir la demanda energética de calefacción en el barrio supone el mayor reto, pues esta supera con creces a la demanda energética de refrigeración. Es la demanda energética de calefacción, pues, donde se encuentra el mayor potencial de ahorro, por lo que las estrategias de acondicionamiento a adoptar deberán ir encaminadas a reducir, prioritariamente, la misma.
- En análisis en profundidad de los resultados de la evaluación energética permite establecer un conjunto de estrategias de acondicionamiento pasivo, tanto para el entorno urbano como para el edificio, en el tejido existente en el barrio y en nuevas planificaciones urbanas. La propuesta de una nueva morfología urbana en base a estas estrategias evidencia el gran potencial que supone apostar por un adecuado diseño urbano, pudiéndose alcanzar ahorros energéticos de, aproximadamente, un 60%.
- Realizar el diagnóstico energético en todos los barrios de la ciudad permitiría comparar su comportamiento energético e identificar aquellos barrios más vulnerables, a los que se les asocia una necesidad preferente de rehabilitación energética.
- La implementación de la metodología en un municipio puede servir de apoyo a la administración local y otros agentes durante la elaboración de políticas energéticas y la toma de decisiones, y constituir un instrumento para la propuesta de estrategias tanto para la intervención en tejidos existentes ya consolidados, como para el diseño de futuros planeamientos urbanos.

7.2 FUTUROS DESARROLLOS

Tras el desarrollo del trabajo se han obtenido ciertos resultados en los que resultaría interesante profundizar, abriendo así paso a futuras líneas de investigación relacionadas con la tesis, las cuales se presentan a continuación.

En relación al desarrollo de la metodología:

- Implementar la metodología en otros patrones urbanos (irregular, radial, lineal, etc.) para determinar diferentes conjuntos de ecuaciones de predicción que complementen al conjunto aquí obtenido. Ello permitiría caracterizar energéticamente toda una ciudad y comparar el comportamiento energético de diferentes áreas urbanas.

- Integrar nuevas covariables en la metodología para investigar su efecto sobre el comportamiento energético pasivo del parque edificatorio residencial. Como por ejemplo podrían ser, el efecto de la inercia térmica de los cerramientos de la envolvente del edificio u otros aspectos bioclimáticos relacionados con el urbanismo (viento, vegetación, etc.) y que son considerados en las HESU.
- Integrar el uso de la tecnología BIM (*Building Information Modelling*) en el desarrollo de la metodología e interrelacionarla con la tecnología SIG. Ello permitiría, además de georreferenciar la información urbana en mapas mediante SIG, alcanzar un nivel mucho más profundo de detalle a nivel de edificio mediante BIM. Las herramientas BIM permiten la gestión de datos del edificio durante su ciclo de vida, de manera que una gran cantidad de información constructiva del edificio queda almacenada. Esta podría ser tratada para explorar otros aspectos significativos en el comportamiento energético del parque edificatorio residencial.

En relación a la aplicación de la metodología:

- Obtener datos de consumo energético real, a través de facturas energéticas o de la monitorización del edificio, y compararlos con datos experimentales simulados de demanda energética. Ello permitiría investigar los factores que influyen en la desviación entre demanda y consumo, como podrían ser el patrón de comportamiento de los ocupantes, su poder adquisitivo o su nivel de concienciación medioambiental, los cuales resultan de difícil estimación durante el proceso de simulación, pero, sin embargo, tienen una gran influencia en el consumo energético final del edificio, provocando grandes desviaciones.
- Como se desprende del análisis de las HESU, los aspectos socio-económico son temas poco abordados en el análisis de la sostenibilidad urbana. Sin embargo, su elevada influencia en el consumo energético del parque edificado, hace que sean aspectos interesantes a estudiar e incorporar en futuras posibles mejoras de la metodología. Así, podrían explorarse nuevas covariables socio-económicas asociadas a los consumos. Ello podría realizarse por medio de encuestas que, además de recoger información socio-económica sobre los usuarios, podrían recabar información sobre posibles intervenciones o reformas que hayan experimentado los edificios, para ajustar las características constructivas de su envolvente térmica.
- Determinado el diagnóstico energético de un área urbana, resulta interesante estudiar mejoras de eficiencia energética, pasivas y activas, y cuantificar sus beneficios en el comportamiento energético del parque edificatorio residencial. La base de datos SIG y la evaluación energética de los edificios representativos, como resultados de la implementación de la metodología, servirían como base en este estudio. Ello haría posible el diseño de diversos escenarios, como son, por ejemplo, la cuantificación del ahorro obtenido tras implementar una determinada estrategia, o estudiar los efectos de la puesta en práctica de una nueva normativa u ordenanza municipal.
- La caracterización del parque edificatorio residencial de la ciudad y la base de datos SIG obtenida pueden emplearse en otros estudios con diferente finalidad, como, por ejemplo, el análisis de aspectos sociales y económicos. Así, la incorporación de nueva información a la base de datos permitiría el cruce de información para establecer relaciones de dependencia entre estos y el aspecto energético.
- Analizar el impacto de la implementación de soluciones constructivas de rehabilitación edificatoria integrando, además del aspecto energético, el aspecto ambiental a través de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida.



8. PUBLICACIONES RELACIONADAS

Propuesta **metodológica** para la caracterización del **comportamiento energético pasivo** del parque edificatorio **residencial** existente considerando su contexto **urbano**.

Las publicaciones derivadas de la presente tesis, según cada una de las temáticas, son las que se exponen en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1 Publicaciones relacionadas con la tesis

Artículos en revistas indexadas JCR	Parte de la tesis relacionada
<p>Braulio-Gonzalo, M., Bovea, M. D., y Ruá, M. J. (2015). Sustainability on the urban scale: Proposal of a structure of indicators for the Spanish context. <i>Environmental Impact Assessment Review</i>, 53, 16-30. http://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.03.002</p> <p>Estado: Publicado</p>	<p>Capítulo 2. Estado del arte</p>
<p>Braulio-Gonzalo, M., Juan, P., Bovea, M. D., y Ruá, M. J. Modelling energy efficiency performance of residential building stocks based on Bayesian statistical inference</p> <p>Estado: En proceso de revisión en la revista <i>Environmental Modelling & Software</i> (2016)</p>	<p>Capítulo 4. Desarrollo de la metodología (Etapa 3)</p> <p>Capítulo 5. Implementación de la metodología en un caso de aplicación</p>
<p>Braulio-Gonzalo, M., Bovea, M. D., Ruá, M. J. y Juan, P. A methodology for predicting the passive energy performance of residential stocks on the neighbourhood and city scales</p> <p>Estado: Enviado a la revista <i>Journal of Cleaner Production</i> (2016)</p>	<p>Capítulo 4. Desarrollo de la metodología</p> <p>Capítulo 5. Implementación de la metodología en un caso de aplicación</p>
<p>Braulio-Gonzalo, M., Ruá, M. J. y Bovea, M. D. Methodology for characterising urban form patterns: influence on energy assessment of neighbourhoods</p> <p>Estado: Enviado a la revista <i>Cities</i> (2016)</p>	<p>Capítulo 4. Desarrollo de la metodología (Etapa 1)</p>
Publicaciones en congresos internacionales	Parte de la tesis relacionada
<p>Braulio-Gonzalo, M., Bovea, M. D., y Ruá, M. J. (2014). Propuesta metodológica para la caracterización energética de edificios existentes. En <i>18th International Congress on Project Management and Engineering</i>. Alcañiz.</p>	<p>Capítulo 4. Desarrollo de la metodología (Etapa 1)</p>
<p>Braulio-Gonzalo, M., Ruá, M.J., y Bovea, M.D. (2015). Characterisation of urban patterns at the neighbourhood scale as an energy parameter. Case study: Castellón de la Plana. En P. Mercader Moyano (Ed.), <i>Proceedings of the II International and IV National Congress on Sustainable Construction and Eco-Efficient Solutions</i> (pp. 1069-1079). Sevilla: University of Seville.</p>	<p>Capítulo 4. Desarrollo de la metodología (Etapa 1)</p>



ANEXO I. LISTADO DE INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD URBANA

Propuesta **metodológica** para la caracterización del **comportamiento energético pasivo** del parque edificatorio **residencial** existente considerando su contexto **urbano**.

Tabla A1.1 Lista de indicadores en la herramienta LEED ND

Code	Categories / Indicators
SMART LOCATION AND LINKAGE	
LEED.1	<i>Smart Location</i>
LEED.2	<i>Imperilled Species and Ecological Communities</i>
LEED.3	<i>Wetland and Water Body Conservation</i>
LEED.4	<i>Agricultural Land Conservation</i>
LEED.5	<i>Floodplain Avoidance</i>
LEED.6	<i>Preferred Locations</i>
LEED.7	<i>Brownfield Redevelopment</i>
LEED.8	<i>Locations with Reduced Automobile Dependence</i>
LEED.9	<i>Bicycle Network and Storage</i>
LEED.10	<i>Housing and Jobs Proximity</i>
LEED.11	<i>Steep Slope Protection</i>
LEED.12	<i>Site Design for Habitat or Wetland and Water Body Conservation</i>
LEED.13	<i>Restoration of Habitat or Wetlands and Water Bodies</i>
LEED.14	<i>Long-Term Conservation Management of Habitat or Wetlands and Water Bodies</i>
NEIGHBORHOOD PATTERN AND DESIGN	
LEED.15	<i>Walkable Streets</i>
LEED.16	<i>Compact Development</i>
LEED.17	<i>Connected and Open Community</i>
LEED.18	<i>Walkable Streets</i>
LEED.19	<i>Compact Development</i>
LEED.20	<i>Mixed-Use Neighbourhood Centres</i>
LEED.21	<i>Mixed-Income Diverse Communities</i>
LEED.22	<i>Reduced Parking Footprint</i>
LEED.23	<i>Street Network</i>
LEED.24	<i>Transit Facilities</i>
LEED.25	<i>Transportation Demand Management</i>
LEED.26	<i>Access to Civic and Public Spaces</i>
LEED.27	<i>Access to Recreation Facilities</i>
LEED.28	<i>Visitability and Universal Design</i>
LEED.29	<i>Community Outreach and Involvement</i>
LEED.30	<i>Local Food Production</i>
LEED.31	<i>Tree-Lined and Shaded Streets</i>
LEED.32	<i>Neighbourhood Schools</i>
GREEN INFRASTRUCTURE AND BUILDINGS	
LEED.33	<i>Certified Green Building</i>
LEED.34	<i>Minimum Building Energy Efficiency</i>
LEED.35	<i>Minimum Building Water Efficiency</i>
LEED.36	<i>Construction Activity Pollution Prevention</i>
LEED.37	<i>Certified Green Buildings</i>
LEED.38	<i>Building Energy Efficiency</i>
LEED.39	<i>Building Water Efficiency</i>
LEED.40	<i>Water-Efficient Landscaping</i>
LEED.41	<i>Existing Building Reuse</i>
LEED.42	<i>Historic Resource Preservation and Adaptive Use</i>
LEED.43	<i>Minimized Site Disturbance in Design and Construction</i>
LEED.44	<i>Stormwater Management</i>
LEED.45	<i>Heat Island Reduction</i>
LEED.46	<i>Solar Orientation</i>
LEED.47	<i>On-Site Renewable Energy Sources</i>
LEED.48	<i>District Heating and Cooling</i>
LEED.49	<i>Infrastructure Energy Efficiency</i>

Tabla AI.1 Lista de indicadores en la herramienta LEED ND (continuación)

Code	Categories / Indicators
LEED.50	<i>Wastewater Management</i>
LEED.51	<i>Recycled Content in Infrastructure</i>
LEED.52	<i>Solid Waste Management Infrastructure</i>
LEED.53	<i>Light Pollution Reduction</i>
INNOVATION AND DESIGN PROCESS	
LEED.54	<i>Innovation and Exemplary Performance</i>
LEED.55	<i>LEED® Accredited Professional</i>
REGIONAL PRIORITY CREDIT	
LEED.56	<i>Regional Priority</i>

Tabla A1.2 Lista de indicadores en la herramienta BREEAM Communities

Code	Categories / Indicators
CLIMATE & ENERGY	
BRE.1	<i>Flood and risk assessment (Location)</i>
BRE.2	<i>Surface water runoff</i>
BRE.3	<i>Rainwater SUDS</i>
BRE.4	<i>Heat Island</i>
BRE.5	<i>Energy Efficiency</i>
BRE.6	<i>Onsite Renewables</i>
BRE.7	<i>Future Renewable(s)</i>
BRE.8	<i>Services</i>
BRE.9	<i>Water consumption</i>
BRE.10	<i>Design-Weather Resilience</i>
BRE.11	<i>Sub/smart-metering</i>
RESOURCES	
BRE.12	<i>Low impact</i>
BRE.13	<i>Locally sourced materials</i>
BRE.14	<i>Road Construction</i>
BRE.15	<i>Resource Efficiency</i>
BRE.16	<i>Groundwater</i>
BRE.17	<i>Land Remediation</i>
PLACE SHAPING	
BRE.18	<i>Sequential Approach</i>
BRE.19	<i>Land Reuse</i>
BRE.20	<i>Building Reuse</i>
BRE.21	<i>Landscaping</i>
BRE.22	<i>Design and access</i>
BRE.23	<i>Green areas</i>
BRE.24	<i>Local Demographics</i>
BRE.25	<i>Affordable Housing</i>
BRE.26	<i>Secured by Design</i>
BRE.27	<i>Active Frontages</i>
BRE.28	<i>Defensive Spaces</i>
BRE.29	<i>Local Vernacular</i>
BRE.30	<i>Security Lighting</i>
BRE.31	<i>Form of Development-Connectivity</i>
BRE.32	<i>Form of Development-Pedestrian Movement</i>
TRANSPORT	
BRE.33	<i>Location/Capacity</i>
BRE.34	<i>Availability-Frequency</i>
BRE.35	<i>Facilities</i>
BRE.36	<i>Local Amenities</i>
BRE.37	<i>Network-cycling</i>
BRE.38	<i>Facilities-cycling</i>
BRE.39	<i>Car clubs</i>
BRE.40	<i>Flexible parking-Traffic</i>
BRE.41	<i>Local parking-Traffic</i>
BRE.42	<i>Home Zones-Traffic</i>
BRE.43	<i>Transport Assessment-Traffics</i>
BRE.44	<i>Electric vehicle charging points-Low carbon transport</i>
BRE.45	<i>Transport Impacts-Road design</i>
BRE.46	<i>Commercial LGV Plan-Vehicular Access</i>

Tabla AI.2 Lista de indicadores en la herramienta BREEAM Communities (continuación)

Code	Categories / Indicators
COMMUNITY	
BRE.47	<i>Inclusive Design</i>
BRE.48	<i>Consultation</i>
BRE.49	<i>Development user guide</i>
BRE.50	<i>Management and operation</i>
ECOLOGY	
BRE.51	<i>Ecological Survey</i>
BRE.52	<i>Biodiversity Action Plan</i>
BRE.53	<i>Native Flora</i>
BRE.54	<i>Wildlife corridors</i>
BUSINESS	
BRE.55	<i>Business Priority Sectors</i>
BRE.56	<i>Labour and Skills</i>
BRE.57	<i>Employment</i>
BRE.58	<i>New business</i>
BRE.59	<i>Investment</i>
BUILDINGS	
BRE.60	<i>Domestic-Code for sustainable homes</i>
BRE.61	<i>Domestic-Code for sustainable homes</i>
BRE.62	<i>Building refurbishment</i>
INNOVATION	
BRE.63	<i>Innovation</i>

Tabla AI.3. Lista de indicadores en la herramienta CASBEE UD

Code	Categories/Indicators
QUD1 Natural Environment (microclimates and ecosystems)	
	<i>1.1.1 Consideration and conservation of microclimates in pedestrian space in summer</i>
CASBEE.1	<i>1.1.1.1 Mitigation of heat island effect with the passage of air</i>
CASBEE.2	<i>1.1.1.2 Mitigation of heat island effect with shading</i>
CASBEE.3	<i>1.1.1.3 Mitigation of heat island effect with green space and open water etc.</i>
CASBEE.4	<i>1.1.1.4 Consideration for the positioning of heat exhaust</i>
	<i>1.1.2 Consideration and conservation of terrain</i>
CASBEE.5	<i>1.1.2.1 Building layout and shape design that consider existing topographic character</i>
CASBEE.6	<i>1.1.2.2 Conservation of topsoil</i>
CASBEE.7	<i>1.1.2.3 Consideration of soil contamination</i>
	<i>1.1.3 Consideration and conservation of water environment</i>
CASBEE.8	<i>1.1.3.1 Conservation of water bodies</i>
CASBEE.9	<i>1.1.3.2 Conservation of aquifers</i>
CASBEE.10	<i>1.1.3.3 Consideration of water quality</i>
	<i>1.1.4 Conservation and creation of habitat</i>
CASBEE.11	<i>1.1.4.1 Grasping the potential of the natural environment</i>
CASBEE.12	<i>1.1.4.2 Conservation or regeneration of natural resources</i>
CASBEE.13	<i>1.1.4.3 Creating ecosystem networks</i>
CASBEE.14	<i>1.1.4.4 Providing a suitable habitat for flora and fauna</i>
	<i>1.1.5 Other consideration for the environment inside the designated area</i>
CASBEE.15	<i>1.1.5.1 Ensuring good air quality, acoustic and vibration environments</i>
CASBEE.16	<i>1.1.5.2 Improving the wind environment</i>
CASBEE.17	<i>1.1.5.3 Securing sunlight</i>
QUD2 Service functions for the designated area	
	<i>1.2.1 Performance of supply and treatment systems(mains water, sewerage and energy)</i>
CASBEE.18	<i>1.2.1.1 Reliability of supply and treatment systems</i>
CASBEE.19	<i>1.2.1.2 Flexibility to meet changing demand and technical innovation in supply and treatment systems</i>
	<i>1.2.2 Performance of information systems</i>
CASBEE.20	<i>1.2.2.1 Reliability of information systems</i>
CASBEE.21	<i>1.2.2.2 Flexibility to meet changing demand and technical innovation in information systems</i>
CASBEE.22	<i>1.2.2.3 Usability (information systems)</i>
	<i>1.2.3 Performance of transportation systems</i>
CASBEE.23	<i>1.2.3.1 Sufficient capacity of transportation systems</i>
CASBEE.24	<i>1.2.3.2 Securing safety in pedestrian areas etc.</i>
	<i>1.2.4 Disaster and crime prevention performance</i>
CASBEE.25	<i>1.2.4.1 Understanding the risk from natural hazards</i>
CASBEE.26	<i>1.2.4.2 Securing open space as wide area shelter</i>
CASBEE.27	<i>1.2.4.3 Providing proper evacuation routes</i>
CASBEE.28	<i>1.2.4.4 Crime prevention performance (surveillance and territoriality)</i>
	<i>1.2.5 Convenience of daily life</i>
CASBEE.29	<i>1.2.5.1 Distance to daily-use stores and facilities</i>
CASBEE.30	<i>1.2.5.2 Distance to medical and welfare facilities</i>
CASBEE.31	<i>1.2.5.3 Distance to educational and cultural facilities</i>
CASBEE.32	<i>1.2.6 Consideration for universal design</i>

Tabla A1.3 Lista de indicadores en la herramienta CASBEE UD (continuación)

Code	Categories/Indicators
QU03 Contribution to the local community (history, culture, scenery and revitalization)	
	<i>1.3.1 Use of local resources</i>
CASBEE.33	<i>1.3.1.1 Use of local industries, personnel and skills</i>
CASBEE.34	<i>1.3.1.2 Conservation and use of historical, cultural and natural assets</i>
CASBEE.35	<i>1.3.2 Contribution to the formation of social infrastructure</i>
	<i>1.3.3 Consideration for nurturing a good community</i>
CASBEE.36	<i>1.3.3.1 Formation of local centres and fostering of vitality and communication</i>
CASBEE.37	<i>1.3.3.2 Creation of various opportunities for public involvement</i>
	<i>1.3.4. Consideration for urban context and scenery</i>
CASBEE.38	<i>1.3.4.1 Formation of urban context and scenery</i>
CASBEE.39	<i>1.3.4.2 Harmony with surroundings</i>
LRUD1 Environmental impact on microclimates, façade and landscape	
	<i>2.1.1 Reduction of thermal impact on the environment outside the designated area in summer</i>
CASBEE.40	<i>2.1.1.1 Planning of building group layout and forms to avoid blocking wind</i>
CASBEE.41	<i>2.1.1.2 Consideration for paving materials</i>
CASBEE.42	<i>2.1.1.3 Consideration for building cladding materials</i>
CASBEE.43	<i>2.1.1.4 Consideration for reduction of waste heat</i>
	<i>2.1.2 Mitigation of impact on geological features outside the designated area</i>
CASBEE.44	<i>2.1.2.1 Prevention of soil contamination</i>
CASBEE.45	<i>2.1.2.2 Reduction of ground subsidence</i>
	<i>2.1.3 Prevention of air pollution affecting outside the designated area</i>
CASBEE.46	<i>2.1.3.1 Source control measures</i>
CASBEE.47	<i>2.1.3.2 Measures concerning means of transport</i>
CASBEE.48	<i>2.1.3.3 Atmospheric purification measures</i>
	<i>2.1.4 Prevention of noise, vibration and odor affecting outside the designated area</i>
CASBEE.49	<i>2.1.4.1 Reduction of the impact of noise</i>
CASBEE.50	<i>2.1.4.2 Reduction of the impact of vibration</i>
CASBEE.51	<i>2.1.4.3 Reduction of the impact of odor</i>
	<i>2.1.5 Mitigation of wind hazard and sunlight obstruction affecting outside the designated area</i>
CASBEE.52	<i>2.1.5.1 Mitigation of wind hazard</i>
CASBEE.53	<i>2.1.5.2 Mitigation of sunlight obstruction</i>
	<i>2.1.6 Mitigation of light pollution affecting outside the designated area</i>
CASBEE.54	<i>2.1.6.1 Mitigation of light pollution from lighting and advertising displays etc.</i>
CASBEE.55	<i>2.1.6.2 Mitigation of sunlight reflection from building facade and landscape materials</i>
LRUD2 Social infrastructure	
	<i>2.2.1 Reduction of mains water supply (load)</i>
CASBEE.56	<i>2.2.1.1 Encouragement for the use of stored rainwater</i>
CASBEE.57	<i>2.2.1.2 Water recirculation and use through a miscellaneous water system</i>
	<i>2.2.2 Reduction of rainwater discharge load</i>
CASBEE.58	<i>2.2.2.1 Mitigation of surface water runoff using permeable paving and percolation trenches</i>
CASBEE.59	<i>2.2.2.2 Mitigation of rainwater outflow using retaining pond and flood control basins</i>
	<i>2.2.3 Reduction of the treatment load from sewage and graywater</i>
CASBEE.60	<i>2.2.3.1 Load reduction using high-level treatment of sewage and graywater</i>
CASBEE.61	<i>2.2.3.2 Load levelling using water discharge balancing tanks etc.</i>
	<i>2.2.4 Reduction of waste treatment load</i>
CASBEE.62	<i>2.2.4.1 Reduction of collection load using centralized-storage facilities</i>
CASBEE.63	<i>2.2.4.2 Installation of facilities to reduce the volume and weight of waste and employ composting</i>
CASBEE.64	<i>2.2.4.3 Classification, treatment and disposal of waste</i>
	<i>2.2.5 Consideration for traffic load</i>
CASBEE.65	<i>2.2.5.1 Reduction of the total traffic volume through modal shift</i>
CASBEE.66	<i>2.2.5.2 Efficient traffic assignment on local road network</i>
	<i>2.2.6 Effective energy use for the entire designated area</i>

Tabla A1.3 Lista de indicadores en la herramienta CASBEE UD (continuación)

Code	Categories/Indicators
CASBEE.67	2.2.6.1 Area network of unused and renewable energy
CASBEE.68	2.2.6.2 Load levelling of electrical power and heat through area network
CASBEE.69	2.2.6.3 Area network of high-efficient energy system
LRUD3 Management of the local environment	
	2.3.1 Consideration of global warming
CASBEE.70	2.3.1.1 Construction and materials, etc. (global warming)
CASBEE.71	2.3.1.2 Energy (global warming)
CASBEE.72	2.3.1.3 Transportation (global warming)
	2.3.2 Environmentally responsible construction management
CASBEE.73	2.3.2.1 Acquisition of ISO14001 certification
CASBEE.74	2.3.2.2 Reduction of by-products of construction
CASBEE.75	2.3.2.3 Energy saving activity during construction
CASBEE.76	2.3.2.4 Reduction of construction-related impact affecting outside the designated area
CASBEE.77	2.3.2.5 Selection of materials with consideration for the global environment
CASBEE.78	2.3.2.6 Selection of materials with consideration for impact on health
	2.3.3 Regional transportation planning
CASBEE.79	2.3.3.1 Coordinating with the administrative master plans for transportation system
CASBEE.80	2.3.3.2 Measures for transportation demand management
	2.3.4 Monitoring and management system
CASBEE.81	2.3.4.1 Monitoring and management system to reduce energy usage inside the designated area
CASBEE.82	2.3.4.2 Monitoring and management system to conserve the surrounding environment of the designated area

Tabla AI.4 Lista de indicadores en la herramienta ECOCITY

Code	Element/Theme/Objective/Measure
1. REGIONAL AND URBAN CONTEXT	
1.1 NATURAL ENVIRONMENT	
1.1.1 Strive for the protection of the surrounding landscape and its natural elements	
ECO.1	<i>Consider the boundaries of the city as a zone for exchange between the city and surroundings (water cycle, vegetation, wildlife, recreation) and create conditions for the penetration of the surrounding landscape into the city.</i>
ECO.2	<i>Establish sound measures to avoid unplanned future extensions of settlements.</i>
ECO.3	<i>Strive for a recreation of landscape/natural habitats in areas with a declining population or industry ("shrinking cities").</i>
ECO.4	<i>Preserve bio-diversity and habitats in the surrounding landscape.</i>
ECO.5	<i>Minimise the impact of harmful substances on vegetation, wildlife and water systems.</i>
ECO.6	<i>Preserve or re-establish green corridors on the regional and municipal scale as open-space connections.</i>
1.1.2 Strive for the protection of the surrounding landscape and its natural elements	
ECO.7	<i>Offer recreational areas in the surrounding landscape with attractive connections from the urban area to help people relate to the natural environment and to offer opportunities for weekend recreation close to residential areas.</i>
ECO.8	<i>Develop and foster sustainable regional agriculture (e.g. organise direct marketing of regional food), forestry and tourism, also maintaining the cultural landscape.</i>
ECO.9	<i>Use surplus biomass from regional agriculture and forestry for energy generation.</i>
1.1.3 Plan in accordance with the climatic, topographical and geological setting	
ECO.10	<i>Use (and preserve) landscape and topographic elements that are important for the urban climate (e.g. groves and forests as cold air sources, lakes as climatic balancing elements, valleys and mountain sides as air exchange corridors) and avoid barriers in air exchange corridors.</i>
ECO.11	<i>Keep industry and unavoidable sources of air pollution out of areas and corridors which are important for the urban climate and consider the main wind directions when expanding settlement areas.</i>
ECO.12	<i>Consider the local climatic conditions for the design of public spaces (wind protection, roofs as rain protection, exposure to the sun, shadowing elements) and for building design (shape, materials, energy concept, etc.).</i>
ECO.13	<i>Take the local topography into account for the transport systems (e.g. for walking and cycling pathways), for energy-efficiency (e.g. by avoiding settlements on shadowy northern inclinations) and for water systems (e.g. rainwater management on the surface).</i>
ECO.14	<i>Plan with the geological conditions (soil, groundwater, etc.) e.g. for urban greenery, rainwater management and constructing buildings.</i>
1.2 BUILT ENVIRONMENT	
1.2.1 Strive for a polycentric, compact and transit-oriented urban structure	
ECO.15	<i>Strive for a polycentric structure of the city with good accessibility of basic facilities and of the city centre as the main provider of higher-order infrastructures and working places.</i>
ECO.16	<i>Organise the city as a network of mixed-use urban quarters with individual characteristics and identities.</i>
ECO.17	<i>Concentrate urban development at sites with a high potential for public transport, locating new settlements (and new buildings in existing settlements) along (potential) axes of public transport (Transit Oriented Development), and avoid developments that disturb open-space patterns between these axes (green fingers).</i>
ECO.18	<i>Integrate new and existing developments into public transport and communication networks on the local, metropolitan, regional, national and global scale.</i>
ECO.19	<i>Strive for land management on the regional and local scale.</i>
ECO.20	<i>Structure prices and subsidies to achieve changes in development patterns and the transportation system (e.g. building subsidies, road pricing, PT fares etc. differentiated according to location and time).</i>

Tabla A1.4 Lista de indicadores en la herramienta ECOCITY (continuación)

Code	Element/Theme/Objective/Measure
	1.2.2 Consider concentration and decentralisation for supply and disposal systems
ECO.21	<i>Consider the decentralised concentration of energy supply systems such as district heating networks (rather than either huge community heating systems on the scale of entire cities or quarters or very small individual systems).</i>
ECO.22	<i>Maximise the share of renewable energy sources on the regional and local level (e.g. wind power stations or biomass cogeneration power plants from regional sources).</i>
ECO.23	<i>Strive for the decentralisation of wastewater treatment on the site (wastewater wetland facilities) or in buildings (grey water purification plants).</i>
ECO.24	<i>Consider biogas generation from wastewater (black water) for the operation of co-generation or heat plants on site.</i>
ECO.25	<i>Offer possibilities for composting and re-using organic waste on site.</i>
	1.2.3 Promote use, re-use and revitalisation of the cultural heritage
ECO.26	<i>Respect the cultural heritage of the region regarding the historical urban grain (e.g. phases of growth and development, hierarchy and design of street network, texture of building lots, land-use patterns).</i>
ECO.27	<i>Refer to the regional and local building typologies (also regarding protection from sun, wind, rain, snow, etc.), regional culture for living, aesthetics based on local craft skills, etc. and strive to maintain and re-use existing elements such as buildings, open-space elements and infrastructure (also as a contribution to a genius loci based on the continuity of the urban cultural heritage).</i>
	2. URBAN STRUCTURE
	2.1 DEMAND FOR LAND
	2.1.1 Promote the reuse of soil and existing buildings to reduce the land demand and buildings
ECO.28	<i>Strive for a compact city using all possibilities for internal development e.g. in gaps between blocks or buildings (but avoiding overcrowding and ensuring adequate green spaces).</i>
ECO.29	<i>Prioritise the reuse of existing sites (brown field developments) in suitable locations.</i>
ECO.30	<i>Minimise the share of vacant dwellings, buildings and plots through municipal management (e.g. register of available plots/properties within the city, activities for inner city developments).</i>
	2.1.2 Develop structures of qualified high density
ECO.31	<i>Aim at qualified high density to reduce land consumption and to promote a high social density as well as to promote viability and cost effectiveness of public transport, community heating systems and provision of basic facilities.</i>
ECO.32	<i>Consider issues which limit density such as passive and active use of solar energy, good day-lighting conditions, sufficient open spaces, surfaces for water management, air exchange corridors.</i>
ECO.33	<i>Concentrate the highest development densities around public transport stops.</i>
ECO.34	<i>Use compact and multi-storey building typologies for residential housing and commercial uses.</i>
ECO.35	<i>Consider increasing density by minimising land-demand for motorised traffic and parking.</i>
	2.2 LAND USE
	2.2.1 Organise a balance of residential, employment and educational uses as well as supply (of goods and services), and social and recreational facilities
ECO.36	<i>Provide a balanced ratio of residential housing and working places.</i>
ECO.37	<i>Provide a balanced ratio of residential housing and commercial units (especially retail for daily needs) as well as cultural, educational and social facilities (e.g. kindergarten, primary, secondary schools, general practitioners, pubs restaurants).</i>
ECO.38	<i>On new sites, include facilities attracting inhabitants of the entire community as focal points (community building).</i>
ECO.39	<i>Maintain and strengthen existing mix of uses while adding new uses into existing mono-functional areas.</i>
ECO.40	<i>Ensure that these facilities are distributed well to enable short travel distances (on foot, by bike or by public transport) within the neighbourhood or the city.</i>

Tabla AI.4 Lista de indicadores en la herramienta ECOCITY (continuación)

Code	Element/Theme/Objective/Measure
	2.2.2 Enable fine-meshed, mixed-use structures at building, block or neighbourhood level
ECO.41	<i>Strive for variability and flexibility of urban and building structures to facilitate changes of use over time.</i>
ECO.42	<i>Optimise the locations for mixed-use at building level (e.g. with commercial uses on the lower floors, residential uses higher up) or at block level (with commercial buildings on the northern edge of blocks or with west or east orientation).</i>
ECO.43	<i>Create differentiated areas with different meshes of mixed structures and different ratios of uses.</i>
	2.3 PUBLIC SPACE
	2.3.1 Provide attractive and liveable public space for everyday life, including considerations of legibility and connectivity
ECO.44	<i>Plan for sufficient public space (squares, convivial streetscapes, green areas) close to living and working environments.</i>
ECO.45	<i>Strive for multi-functionality (avoid mono-functionality) and a strong identity of public spaces.</i>
ECO.46	<i>Create varying urban fabrics of open spaces, building typologies and landscape elements for vivid neighbourhoods with a distinctive genius loci.</i>
ECO.47	<i>Plan a hierarchical system of public spaces (squares, parks, streetscapes) that is interconnected through pedestrian networks and provides changing attractions along spatial sequences; avoid architectural barriers.</i>
ECO.48	<i>Create opportunities for communication and encounter by designing open spaces to enable sufficient quantity and quality of possible social contacts in (high density) neighbourhood areas (e.g. in neighbourhood centres).</i>
ECO.49	<i>Orientate buildings towards public spaces (windows, entrances, attractive ground floor facades, which front appropriate uses).</i>
ECO.50	<i>Provide open-space elements and architecture of high aesthetic quality (water design, surfaces in streets and squares, facades, street furniture, etc.), enabling a variety of sensory experiences, also for children.</i>
ECO.51	<i>Minimise the share of road space provided solely for motor vehicles and the disturbance of public spaces by motorised traffic (bearing in mind especially safety and noise issues).</i>
	2.4 LANDSCAPE / GREEN SPACES
	2.4.1 Integrate natural elements and cycles into the urban tissue
ECO.52	<i>Create and conserve habitats for urban wildlife (animals and plants) and habitat networks (use linear elements to connect open spaces, avoid barriers, create stepping-stone habitats, consider ecological bridges), including green corridors into the surrounding landscape.</i>
ECO.53	<i>Maximise soft landscaping areas for planting (at ground level as well as on facades and roofs).</i>
ECO.54	<i>Create, maintain or recultivate/restore green and water elements within the city (trees, hedges, grassland, planting areas and containers, watercourses, fountains, etc.), especially those of bioclimatic importance.</i>
ECO.55	<i>Maintain the natural embankments and shore areas of surface waters (ponds, lakes, streams or rivers), where necessary restore them.</i>
ECO.56	<i>Minimise sealed surfaces (footprints of buildings, treatment of pavements, parking spaces, etc.).</i>
ECO.57	<i>Strive for a balanced hierarchy of public, semi-public and private green spaces, providing opportunities for gardening for the inhabitants, considering also city farms in appropriate locations.</i>
ECO.58	<i>Offer accessible areas to provide children with personal experience of and conscious perception of the natural environment.</i>

Tabla AI.4 Lista de indicadores en la herramienta ECOCITY (continuación)

Code	Element/Theme/Objective/Measure
2.5 URBAN COMFORT	
2.5.1 Strive for a high daily, seasonal and annual outdoor comfort	
ECO.59	<i>Consider the exposure of public spaces to bioclimatic conditions (light, wind, sun, rain, snow, etc.) to permit the use of public spaces throughout the day and the seasons.</i>
ECO.60	<i>Develop the geometry of quarters and neighbourhoods according to the requirements of urban ventilation (choose climatically favourable layouts and materials for green spaces, blocks and buildings).</i>
ECO.61	<i>Plan for and use water surfaces (e.g. as part of a rainwater management systems) to improve urban comfort and to contribute to natural ventilation on the block or building level.</i>
ECO.62	<i>Increase the absorption capacity of urban land for rainwater (and the filtering capacity for emissions) by planting and maintaining trees and other vegetation, constructing green roofs and facades and by leaving ground unsealed where appropriate.</i>
ECO.63	<i>Reduce the impact of infrastructure for mobile telecommunications, electricity supply, electric railway systems and other technical devices on people's health and well-being (avoiding their exposure to electromagnetic radiation by keeping sufficient distances and using screening materials and structures).</i>
2.5.2 Minimise noise and air pollution	
ECO.64	<i>Avoid noise emissions at source by taking active measures to reduce emissions from traffic, commercial uses, leisure and sports activities.</i>
ECO.65	<i>Improve the air quality by reducing gaseous and particulate emissions from traffic, commercial and industrial units, power stations and household heating systems at source.</i>
ECO.66	<i>Control imissions through passive measures (sufficient distances, protective walls/embankments, shelterbelt plantings, layout of blocks, buildings and floors).</i>
ECO.67	<i>Minimise the impact of construction works on urban comfort.</i>
2.6 BUILDINGS	
2.6.1 Maximise indoor comfort and resource conservation throughout the lifecycle of buildings	
ECO.68	<i>Maintain and re-use existing buildings for existing uses or convert them for new uses and promote their refurbishment (especially regarding energy demand and supply).</i>
ECO.69	<i>Strive for low-energy or passive-house standard in terms of construction and heating, ventilation and air-conditioning (HVAC) equipment (building services).</i>
ECO.70	<i>Use building materials which are 'healthy' in production, construction, use and demolition.</i>
ECO.71	<i>Maximise the durability, detachability and the recyclability of materials and structures.</i>
ECO.72	<i>Allow for reverse-engineering, e.g. to enable later installation of HVAC equipment (building services).</i>
ECO.73	<i>Reduce maintenance requirements of buildings.</i>
2.6.2 Plan flexible, communicative and accessible buildings	
ECO.74	<i>Use flexible building designs to facilitate change of use over time (e.g. from residential to commercial) as well as transformation and adaptation of internal spaces by the user.</i>
ECO.75	<i>Strive for the close connections of buildings to public spaces and for active frontages (facades, allocation of uses and entrances), avoiding architectural barriers to accessibility (lay-out of buildings causing detours, steps, etc.).</i>
ECO.76	<i>Strive for communicative buildings with innovative ideas for living.</i>
ECO.77	<i>Seek new housing concepts for senior citizens including mixed generation housing concepts ('young and old' projects).</i>

Tabla AI.4 Lista de indicadores en la herramienta ECOCITY (continuación)

Code	Element/Theme/Objective/Measure
ECO.78	<i>Consider that buildings are suitable for mixed-use structures (e.g. for commercial uses on the lower floors, residential uses higher up).</i>
3. TRANSPORT	
3.1 SLOW MODES/PUBLIC TRANSPORT	
3.1.1 Minimise distances (in time and space) between activities to reduce travel demand	
ECO.79	<i>Design pedestrian-oriented urban structures with short distances (see density, mixed use) also situating buildings so that they allow the planning of pedestrian networks without long detours (also avoiding main traffic arteries, which are difficult to cross, within a neighbourhood).</i>
ECO.80	<i>Integrate all important destinations (shops, schools, major employment locations) within mixed use neighbourhoods and/or close to public transport stops and ensure good connections to external destinations.</i>
ECO.81	<i>Create high quality open spaces and structures (squares, parks, streetscapes, etc.) close to residential areas to reduce demand for leisure travel.</i>
3.1.2 Give priority to pedestrian and cycle paths as the main network for internal neighbourhood traffic	
ECO.82	<i>Interconnect pedestrian and cycle paths to a dense network, which is as far as possible independent from major routes for motorised travel but not so isolated as to create security problems.</i>
ECO.83	<i>Integrate public spaces and streetscapes of high spatial quality and changing public activities into the network for non-motorised modes (for attractive walking/cycling and for social control).</i>
ECO.84	<i>Plan for an attractive cycling network that allows speedy circulation also beyond the neighbourhood scale.</i>
ECO.85	<i>Eliminate danger and disturbances from motorised traffic.</i>
ECO.86	<i>Provide barrier-free accessibility to transport networks and buildings for everyone – including the handicapped and those with prams, pushchairs or carts to transport goods.</i>
ECO.87	<i>Provide attractive supporting infrastructure for pedestrians – with e.g. continuous weather protection (arcades, passages, roofed pavements) along the main routes as well as benches/seats - and for cyclists (parking and storage facilities for bikes, weather protection, etc.).</i>
3.1.3 Give priority to public transport for the connections beyond the neighbourhood level	
ECO.88	<i>Integrate well-aligned public transport lines and corridors (close to people and allowing rapid connections) into the urban structure and design the structure of a new neighbourhood around the (optimised) routes of public transport.</i>
ECO.89	<i>Develop an integrated system of public transport (demand-responsive transport services, bus, light rail, heavy rail) to provide connections both within the municipalities and in regional networks and provide bike & ride / kiss & ride facilities at stops and interchanges.</i>
ECO.90	<i>Optimise distances between public transport stops to maximise rider catchments and provide central stops in the centre of new neighbourhoods.</i>
ECO.91	<i>Allocate stops to uses and vice versa in such a way that the majority of important public facilities are situated near the stops.</i>

Tabla AI.4 Lista de indicadores en la herramienta ECOCITY (continuación)

Code	Element/Theme/Objective/Measure
3.1.4 Provide mobility management measures to support modal shift to environmentally compatible modes	
ECO.92	<i>Establish mobility centres providing comprehensive and easily accessible information on local public transport and railway including schedules and inter-modal travel options (mobility help-desk, internet platform) and offering comprehensive services for diverse transport demands (e.g. sale of public transport tickets; reservation for demand responsive transport; bicycle station for parking, repair, hire, etc.; car-sharing and hire systems, ride-share agency).</i>
ECO.93	<i>Provide real-time information on timetables for passengers at stations, in vehicles and on the internet (arrivals, departures, connections and schedule changes) from a control station.</i>
ECO.94	<i>Target new households with tailored advice on mobility alternatives, possibly including introductory offers on public transport season tickets, car clubs, etc.</i>
ECO.95	<i>Offer "mobility packages", e.g. including car sharing offers, public transport information, reduced cost season ticket, low cost home delivery services, discounts on taxi services, etc.</i>
ECO.96	<i>Organise awareness-raising-campaigns and provide advice for larger institutions (e.g. businesses, schools, etc.) on sustainable organisation of mobility of both employees and customers, as well as the use of their own vehicle fleet.</i>
3.2 INDIVIDUAL MOTORISED TRAVEL	
3.2.1 Reduce volume and speed of individual motorised traffic	
ECO.97	<i>Reduce the speed of motorised traffic by using traffic calming measures and appropriate regulations.</i>
ECO.98	<i>Strive for a differentiated shape and hierarchy of the road network (lane width, speeds, etc.) with lower levels of the hierarchy not dominated by motorised traffic (e.g. home zones, bicycle streets) and with minimum through traffic.</i>
ECO.99	<i>Plan car-free or car-reduced areas of sufficient size to allow all the advantages of living and moving without a car to be experienced.</i>
ECO.100	<i>Minimise land consumption for motorised traffic (length and width of streets, areas for parking).</i>
ECO.101	<i>Promote efficient use of cars (e.g. through car-sharing or an agency for ride-sharing).</i>
ECO.102	<i>Restrict access to particular areas for non-public motorised traffic (e.g. to city or neighbourhood centres).</i>
3.2.2 Support the reduction of motorised traffic through parking management	
ECO.103	<i>Reduce the provision of parking spaces (i.e. the required ratio of parking space per dwelling or work space), especially in central areas with good public transport access; develop car-reduced and car-free areas.</i>
ECO.104	<i>Manage demand for parking through parking charges in central areas to reduce car traffic there.</i>
ECO.105	<i>Minimise parking spaces in public areas to reduce the impact of private cars on the quality of public spaces and reduce overall land consumption for remaining parking places (multi-storey parking, mechanical systems).</i>
ECO.106	<i>Concentrate parking spaces in collective car parks and district parking garages within an acceptable distance to dwellings and not directly at the front door or even inside residential buildings (locating district parking lots at least the same average distances away as public transit stops).</i>
3.3 TRANSPORT OF GOODS	
	<i>3.3.1 develop a neighbourhood logistics and delivery concept to minimise the need for individual load carrying by car</i>

Tabla A1.4 Lista de indicadores en la herramienta ECOCITY (continuación)

Code	Element/Theme/Objective/Measure
ECO.107	<i>Organise a neighbourhood logistics system (neighbourhood logistics / distribution centre, shopping boxes, etc.) including co-ordinated goods delivery to private households (also for products ordered via e-commerce); using alternatively fuelled vehicles (e.g. electricity from renewable sources or hydrogen).</i>
ECO.108	<i>Integrate locations for waste collection and storage facilities (containers, etc.) in the urban and building structure to ensure efficient access for collection vehicles.</i>
ECO.109	<i>Locate facilities generating demand for goods transportation at sites allowing short distances for city logistics.</i>
ECO.110	<i>Use information system technologies to optimise routes of delivery, waste collection and (construction) material transport.</i>
	3.3.2 Plan efficient construction logistics
ECO.111	<i>Promote the use of local materials to minimise construction traffic.</i>
ECO.112	<i>Plan the re-use of excavation materials on-site as far as possible.</i>
ECO.113	<i>Organise necessary construction traffic (removal, delivery, distribution) in an effective way.</i>
	4. ENERGY AND MATERIAL FLOWS
	4.1 ENERGY
	4.1.1 Optimise energy efficiency of the urban structure
ECO.114	<i>Design compact settlements and compact buildings weighing up low surface to volume ratios against the need for solarisation (next measure) and day-lighting.</i>
ECO.115	<i>Solarise the urban structure: layout of buildings for passive heating/cooling and for natural day-lighting (orientate buildings to the sun, avoid shading by optimising the heights of buildings in relation to distances between them, design roofs to use solar applications efficiently).</i>
ECO.116	<i>Strive for high-density developments enabling the economic application of district heating systems or co-generation plants.</i>
	4.1.2 Minimise energy demand of buildings
ECO.117	<i>Reduce energy losses by striving for a high insulation standard in new and existing buildings (low energy houses, passive-houses) and for a compact design of buildings (low surface-to-volume ratio).</i>
ECO.118	<i>Reduce the heating demand in temperate and cold climates by maximising passive solar energy gains (i.e. high ratio of windows and glass facades on south facades).</i>
ECO.119	<i>Reduce energy demand for cooling in hot climates by reducing uncontrollable solar irradiation into buildings (including devices for protection against overheating, e.g. shades, blinds, etc.) and by reducing the electricity consumption (to avoid additional internal heat generation i.e. through computers, electric devices).</i>
ECO.120	<i>Reduce electricity demand through efficient lighting systems, natural day-light systems (reflectors, light-shelves, light pipes).</i>
ECO.121	<i>Reduce hot water consumption through use of water saving installations.</i>
ECO.122	<i>Use efficient ventilation systems (controlled ventilation, heat recovery, natural ventilation systems including indoor planting zones, do not use conventional air-conditioning).</i>
ECO.123	<i>Use efficient cooling systems (cooling of concrete components, ground ducts, absorption heat pumps, indoor planting zones, water elements, atriums and courtyards).</i>
	4.1.3 Maximise the efficiency of energy use and supply
ECO.124	<i>124. Use efficient heating, ventilating and cooling equipment as well as electrical devices controlled by IT based facility management.</i>
ECO.125	<i>Use energy-saving lighting appliances in buildings and for public space.</i>
ECO.126	<i>Use co-generation plants (CHP) for district heating networks of appropriate size for short pipe lengths preferentially, when demand for heat ensures a useful application of the waste heat.</i>

Tabla A1.4 Lista de indicadores en la herramienta ECOCITY (continuación)

Code	Element/Theme/Objective/Measure
	4.1.4 Give preference to renewable sources for energy supply
ECO.127	<i>Use solar energy, biomass and/or heat recovery for room heating/cooling and water heating.</i>
ECO.128	<i>Use photovoltaics, wind engines and/or biomass co-generation plants.</i>
ECO.129	<i>Provide surfaces for active solar systems on roofs and facades.</i>
	4.2 WATER
	4.2.1 Minimise primary water consumption
ECO.130	<i>Use water saving devices for baths, toilets, kitchens etc. and where appropriate use compost toilets.</i>
ECO.131	<i>Collect rainwater for use in toilets, washing machines, gardening, car wash, etc.</i>
ECO.132	<i>Recycle grey water (all domestic waste water but faeces) for use in toilets, washing machines, gardening, car wash, etc.</i>
ECO.133	<i>Use an efficient watering system for green areas (and preferably use plants with low water demand).</i>
	4.2.2 Minimise impairment of the natural water cycle
ECO.134	<i>Maximise permeability of urban soil and paved surfaces (e.g. parking and play areas, informal foot & cycle paths, etc.).</i>
ECO.135	<i>Strive for unsealing of existing sealed surfaces where appropriate.</i>
ECO.136	<i>Practise storm water management using rain water retention and infiltration measures to maintain the natural water balance and relieve the waste water treatment plants (green roofs, infiltration swales and hollows, trench drain infiltration, retention ponds) taking into account natural flow rates.</i>
ECO.137	<i>Avoid infiltration of natural water cycles by polluted effluent (discharge) (such as from extensive metallic surfaces e.g. zinc and copper roofs and from intensively used traffic areas) and/or use filter technologies.</i>
ECO.138	<i>Maintain or revitalise natural water bodies (ponds, lakes streams and rivers with soft embankments).</i>
ECO.139	<i>Use rainwater fed landscaping elements to provide a sensory experience to increase the quality of public space, to improve urban comfort and to make people aware of water cycle.</i>
ECO.140	<i>Where appropriate purify black and grey water in wastewater wetland areas on site (e.g. reed-bed sewage treatment).</i>
	4.3 WASTE
	4.3.1 Minimise the volume of waste generated and of waste going to disposal
ECO.141	<i>Promote sharing of goods and devices ("sharing instead of ownership") by supporting the exchange of goods and providing hire / loan services in neighbourhoods.</i>
ECO.142	<i>Promote re-use and recycling of waste by separately collecting valuable products and providing interim storage and collection services.</i>
ECO.143	<i>Promote composting systems for treating the biological fractions of waste on site.</i>
ECO.144	<i>Avoid the disposal of untreated waste and creation / disposal of waste with negative impacts on health, well-being and the environment.</i>
ECO.145	<i>Minimise the amount of excavated material to be disposed of (during construction phases) by reducing the amount of soil to be excavated and by using the excavated soil on site, e.g. as building material (concrete aggregates, refilling), as landscaping material, for noise embankments, as cover material, for backfilling, etc.</i>
ECO.146	<i>Maximise separate collection and recycling of construction / demolition rubble (preferably on site).</i>

Tabla A1.4 Lista de indicadores en la herramienta ECOCITY (continuación)

Code	Element/Theme/Objective/Measure
4.4 BUILDING MATERIALS	
4.4.1 Minimise primary building material consumption and maximise recyclability of materials	
ECO.147	<i>Maximise the re-use of buildings and building components.</i>
ECO.148	<i>Design compact settlements instead of detached houses.</i>
ECO.149	<i>Reduce the demand for building materials by reducing hard transport surfaces (particularly tarmacked roads for motorised traffic), by reducing basement areas and by designing lightweight constructions (e.g. timber).</i>
ECO.150	<i>Use recycled materials.</i>
ECO.151	<i>Consider the construction, use and deconstruction phases of buildings when selecting materials (design for recycling): maximise detachability (e.g. screws instead of glue), reusability and recyclability of materials (possibility for re-use of structures is preferential to practicable material recovery); consider reverse-engineering for hvac equipment (building services, supply networks).</i>
ECO.152	<i>Introduce a building inventory (Material Accounting System): information on quantity and quality (i.e. composition) of all building materials to document the recycling as well as pollutant potential of the building.</i>
4.4.2 Maximise the use of environmentally friendly and non-hazardous building materials	
ECO.153	<i>Use local and regional materials.</i>
ECO.154	<i>Use materials of high durability.</i>
ECO.155	<i>Maximise the use of recycled materials for buildings (e.g. recycle concrete or building rubble on site)</i>
ECO.156	<i>Maximise the share of renewable materials (e.g. timber structures, paper pellets for insulation).</i>
ECO.157	<i>Avoid harmful substances (e.g. pvc, solvents, phthalates).</i>
ECO.158	<i>Use building materials with a low demand for primary and non-renewable energy.</i>
5. SOCIO-ECONOMY	
5.1 SOCIAL ISSUES	
5.1.1 Promote social diversity and integration for a balanced social structure	
ECO.159	<i>Aim at a mixed population in terms of income, age, cultural background and lifestyle concepts.</i>
ECO.160	<i>Provide a balanced variety of dwelling types for different population groups (e.g. singles, families, senior citizens) and ownership models (owner-occupied flats and rented apartments, including subsidised / social housing).</i>
ECO.161	<i>Consider social diversity and integration early on in the planning stage since the planning processes for different types of projects (types of accommodation, target user groups) vary considerably.</i>
ECO.162	<i>Ensure participation of citizens, stakeholders and users in decision-making throughout all phases of the project.</i>
ECO.163	<i>Increase the identification of people with the new development by starting participation processes early on in the planning process and by establishing building cooperatives (fostering contacts among future neighbours before moving to new dwellings).</i>
5.1.2 Provide social and other infrastructure with good accessibility	
ECO.164	<i>Provide social services (child care, care for the elderly and other persons in need of support) and health care services (general practitioner, pharmacy etc.) within walking distances (from public transport stops) for most people.</i>
ECO.165	<i>Provide retail facilities for daily needs easily accessibly on foot and by bike.</i>
5.2 ECONOMY	
5.2.1 Offer incentives for businesses and enterprises to move to the area	
ECO.166	<i>Use regional and local economic strengths for attracting businesses and enterprises.</i>
ECO.167	<i>Take existing and emerging regional clusters of businesses into account when selecting businesses to be addressed</i>
ECO.168	<i>Investigate the possibility of offering start-up credits (are there local credit institutions and are they willing to provide loans?) for appropriate small and medium sized enterprises (SMEs) wanting to establish themselves in the area.</i>
ECO.169	<i>Prepare targeted information on access to markets for appropriate goods and services (e.g. can businesses find suppliers and customers in the area and are there markets that can easily be opened up from the location in question?).</i>

Tabla AI.4 Lista de indicadores en la herramienta ECOCITY (continuación)

Code	Element/Theme/Objective/Measure
ECO.170	<i>Favour SMEs, which are appropriate for fine meshed, mixed-use structures.</i>
ECO.171	<i>Pay attention to the “communication potential” by providing good access to the transport network and information and communication media.</i>
	5.2.2 Use the available labour resources
ECO.172	<i>Analyse the strengths and local specifics of the labour force including the availability of workers with different qualifications.</i>
ECO.173	<i>Where possible, promote the employment of people living near to their work places.</i>
ECO.174	<i>Where possible, promote the relocation of employees (potential commuters) to dwellings near their working places.</i>
ECO.175	<i>Look for particular educational institutions (e.g. universities) that enhance the attractiveness of the location.</i>
	5.3 COSTS
	5.3.1 Strive for a long-lived economic infrastructure
ECO.176	<i>Consider the availability of land in the planning area at fair prices (comparison of land prices in this area and in others, restrictions regarding the usage / purchase of land in this area in comparison to others).</i>
ECO.177	<i>Consider potential problems with respect to property rights (does the acquisition of land constitute a problem?).</i>
ECO.178	<i>Consider life-cycle cost models for infrastructure integrating all costs (many ecological measures with higher investment cost lead to lower operating costs and resulting lower life-cycle cost).</i>
ECO.179	<i>Develop a compact urban form with sufficient density as a precondition for attractive and economically viable public transport systems and retail services as well as lower costs for the technical infrastructure (length of energy and water supply networks per head of population, etc.).</i>
ECO.180	<i>Seek alternative models to finance ecological infrastructure (i.e. sale of shares for photovoltaic solar power plants, green electricity collectives).</i>
ECO.181	<i>Consider contracting models for operating the technical infrastructure (e.g. companies operating cogeneration plants (chp) or wood chip energy supply facilities).</i>
	5.3.2 Offer low cost housing, workplaces and space for non-profit uses
ECO.182	<i>Minimise life-cycle costs for buildings (construction, operation, recovery, disposal).</i>
ECO.183	<i>Integrate high-density areas with compact building typologies to decrease construction costs and proportional plot costs.</i>
ECO.184	<i>Offer low-price dwellings through special procedures for low price plots (e.g. Städtebauliche Entwicklungsmaßnahme²⁴), long-term plot-lease, etc.) as well as through low construction costs and thus low sales costs in order to give more social groups the possibility to own property.</i>
ECO.185	<i>Minimise construction costs for buildings through selection of appropriate materials and heating, ventilation and air-conditioning systems, prefabricated modules, appropriate tendering procedures.</i>
ECO.186	<i>Provide conditions for lower household expenditure (i.e. in car-free areas with high-quality provision for other modes; through energy efficient buildings, etc.).</i>
ECO.187	<i>Provide favourable conditions for establishing building cooperatives (advice, long-term lease options for plots, etc.) – such groups generally achieve lower building costs than developers.</i>
ECO.188	<i>Minimise maintenance and operating costs by selecting appropriate materials and HVAC systems and building services.</i>
ECO.189	<i>Offer semi-refurbished existing buildings or new buildings, which are not ready-to-use (i.e. needing some work input from the future users) as an offer to non-profit or low-profit uses.</i>

Tabla AI.5 Lista de indicadores en la herramienta Le modele INDI-RU 2005

Code	Objective/Sub-objective/Indicator
1. PRESERVE AND ENHANCE HERITAGE AND CONSERVE RESOURCES	
1.1 Reduce energy consumption and improve energy management	
INDI.1	1.1.1 Percentage of households with heating - ventilation - insulation better than the average of existing stock (lower consumption than the national average)
INDI.2	1.1.2 Percentage of park buildings with new heating - ventilation - insulation better than that required by regulation (RT 2000-Réglementation thermique)
INDI.3	1.1.3 Measures to save energy consumption in the residential and tertiary sector
INDI.4	1.1.4 Amount of energy costs in the social housing sector
INDI.5	1.1.5. Energy consumption of public buildings
INDI.6	1.1.6 Energy consumption of public lighting.
INDI.7	1.1.7 Percentage of homes and public buildings (including lighting) that use renewable energy
INDI.8	1.1.8 Measures to reduce greenhouse gases emissions caused by heating residential buildings and public tertiary
1.2 Improve water resources management and quality	
INDI.9	1.2.1 Water consumption in the residential sector
INDI.10	1.2.2 Percentage of public facilities using water-saving techniques
INDI.11	1.2.3 Percentage of residential and commercial buildings reusing rainwater
INDI.12	1.2.4 Percentage of stormwater managed in the urban plot from waterproofed areas.
INDI.13	1.2.5 Quality of the sewage network
1.3 Avoid urban sprawl and improve space management	
INDI.14	1.3.1 Urban density
INDI.15	1.3.2 Area of public open space per capita available (depending on the location of the neighbourhood)
INDI.16	1.3.3 Percentage of brownfield and contaminated land
INDI.17	1.3.4 Number of criteria in the implementation and regulation of the Local Town Planning Plan (compared with 21% obj. Of HQE2R)
1.4 Optimise the use of materials (raw materials) and their management	
INDI.18	1.4.1 Percentage of constructed / rehabilitated / demolished buildings that use recycled / environmental labelling / environmental certifications or standards / ACV standards of materials and equipment.
INDI.19	1.4.2 Percentage of public facilities constructed / renovated / demolished, including an environmental quality approach
1.5 Preserve and enhance what has been built and natural heritage	
INDI.20	1.5.1 Measures to preserve and enhance architectural heritage
INDI.21	1.5.2 Percentage of green space subjected to measures to preserve or enhance natural heritage and biodiversity
2. IMPROVE THE QUALITY OF THE LOCAL ENVIRONMENT	
2.1 Preserve and enhance the landscape and visual quality	
INDI.22	2.1.1 Requirements and measures taken to maintain or improve the quality of entries, the neighbourhood and continuity of spaces.
INDI.23	2.1.2 Measures and requirements to be considered in urban furniture and the visual quality of public lighting.
2.2 Improve the quality of housing and buildings	
INDI.24	2.2.1 Building shabby facades (in the urban environment of the district to be treated)
INDI.25	2.2.2 Percentage of projects or constructed or renovated buildings that take into account the context and immediate environment (orientation, ventilation, insulation, shade, proximity to public transport, etc.)
INDI.26	2.2.3 Number of vacant homes.
INDI.27	2.2.4 Number of adapted housing in new developments or housing that can be adapted for the elderly and disabled

Tabla AI.5 Lista de indicadores en la herramienta Le modele INDI-RU 2005 (continuación)

Code	Objective/Sub-objective/Indicator
2.3 Improve cleanliness, hygiene and health	
INDI.28	2.3.1 Importance of public and private spaces that are poorly maintained
INDI.29	2.3.2 Percentage of unhealthy dwellings that do not meet standards of comfort
INDI.30	2.3.3 Proportion of overcrowded housing (2 children or more per room)
INDI.31	2.3.4 Medical supply: public or private sector or hospitals
2.4 Improve safety and risk management (housing and neighbourhood)	
INDI.32	2.4.1 Number of crimes, and theft crimes per 1,000 citizens
INDI.33	2.4.2 Number of victims of trafficking involving pedestrians and two-wheelers per 1,000 inhabitants
INDI.34	2.4.3 Proportion of the population exposed to hazardous products or materials requiring special monitoring
INDI.35	2.4.4 Proportion of the population exposed to natural unprotected hazards
2.5 Improve air quality (indoors and surroundings)	
INDI.36	2.5.1 Proportion of new buildings that meet specifications for indoor air quality.
INDI.37	2.5.2 Proportion of the population exposed to NO ₂ pollution exceeding 50 ug / m ³ average annual hourly
INDI.38	2.5.3 Number of days per year in which the population is exposed to ozone pollution
2.6 Reduce noise	
INDI.39	2.6.1 Percentage of the population exposed to noise
INDI.40	2.6.2 Proportion of the population exposed to noise of 65 dB (A) Leq and between 18:00 to 10:00 p.m.
INDI.41	2.6.3 Proportion of construction / demolition / rehabilitation considering the noise problem for residents
2.7 Minimise waste and improve management	
INDI.42	2.7.1 Proportion of household waste collected by sorting and separate collection
INDI.43	2.7.2 Proportion of construction / demolition / rehabilitation that considers waste management
3. ENHANCE DIVERSITY	
3.1 Ensure the diversity of the population	
INDI.44	3.1.1 Diversity of the workforce by professional category
INDI.45	3.1.2 Employment rate (employed persons / population of working age)
INDI.46	3.1.3 Population distribution by age
3.2 Ensure diversity of functions (economic and social)	
INDI.47	3.2.1 Number of jobs per 1,000 inhabitants
INDI.48	3.2.2 Number of points of sale per 1,000 persons
INDI.49	3.2.3 Number of facilities and public services within 300 m of homes
3.3 Ensure diversity of housing supply	
INDI.50	3.3.1 Diversity of housing according to their status: owner-occupied, private rental, social, public, etc.
INDI.51	3.3.2 Diversity of housing by size
INDI.52	3.3.3 Diversity of housing by type: single, grouped individually, small group, large scale, etc.
4. ENHANCE INTEGRATION	
4.1 Increase levels of education and skills.	
INDI.53	4.1.1 Proportion of children leaving primary school late.
INDI.54	4.1.2 Truancy rate
INDI.55	4.1.3 Number of cases of violence and crime in schools in the area.
4.2 Promote public access to employment, services and facilities of the city	
INDI.56	4.2.1 Population living within 300 m of a facility or public service, or public transport stop, to travel directly to equipment or a public service.
INDI.57	4.2.2 Unemployment rate
INDI.58	4.2.3 Presence of urban voids between the district and the city-district or facilities or attractions.

Tabla AI.5 Lista de indicadores en la herramienta Le modele INDI-RU 2005 (continuación)

Code	Objective/Sub-objective/Indicator
	4.3 Improve the attractiveness of the area by creating living spaces and meeting places for all city residents
INDI.59	4.3.1 Presence of facilities or services of common interest
INDI.60	4.3.2 Number of days a year marked by a market-type event, show, exhibit, etc.
INDI.61	4.3.3 Proportion of main dwellings in the total housing stock
	4.4 Avoid motorised travel and improve transportation infrastructure of low environmental impact (transport, two wheels, on foot)
INDI.62	4.4.1 Length of streets in the district (public transport, pedestrian walkways, bike path) in linear feet per inhabitant
INDI.63	4.4.2 Proportion of journeys made by public transport
INDI.64	4.4.3 Proportion of journeys made on foot or bicycle, depending on the location of the district regarding the city
INDI.65	4.4.4 Length of streets without footpaths or footpaths in disrepair
INDI.66	4.4.5 Municipal or private systems that favour motorised traffic and public transport.
INDI.67	4.4.6 Quality of parking system
	5. STRENGTHEN SOCIAL RELATIONSHIPS
	5.1 Strengthen social cohesion and participation
INDI.68	5.1.1 Percentage of the population participating in sustainable development initiatives in the area (especially in Agenda 21).
INDI.69	5.1.2 Number of built and rehabilitated landscaped public spaces as part of a consultation with residents' buildings.
	5.2 Improve solidarity networks and social capital
INDI.70	5.2.1 Percentage of the population participating in community activities and solidarity actions
INDI.71	5.2.2 Presence of activities in the social and solidarity economy field
INDI.72	5.2.3 Presence of integration of economic activities into the area (construction waste, wood, maintenance, etc.)
INDI.73	5.2.4 Presence of North / South solidarity

Tabla A1.6 Lista de indicadores en la herramienta BIRDGE

Code	Sustainability dimension/Category/Indicator
ENVIRONMENTAL	
1. ENERGY	
BRDG.1	Energy consumption by cooling/heating
BRDG.2	Anthropogenic heat
BRDG.3	Bowen ratio
BRDG.4	Percentage of energy from renewable sources
2. THERMAL COMFORT	
BRDG.5	Thermal comfort index (cooling power)
BRDG.6	Air temperature
BRDG.7	Number of days above air temperature threshold
3. WATER	
BRDG.8	Water consumption
BRDG.9	Evapotranspiration
BRDG.10	Infiltration
BRDG.11	Surface run-off
BRDG.12	Potential flood risk
4. GREENHOUSE GASES	
BRDG.13	Emissions (CO ₂ , CH ₄)
5. AIR QUALITY	
BRDG.14	Concentrations (NO _x , PM ₁₀ , PM _{2.5} , O ₃ , CO, SO ₂)
BRDG.15	Exceedances (NO _x , PM ₁₀ , O ₃ , SO ₂)
BRDG.16	Potential population exposure (NO _x , PM ₁₀ , O ₃ , SO ₂)
SOCIAL	
6. LAND USE	
BRDG.17	New urbanized areas
BRDG.18	Brownfields re-used
BRDG.19	Density of development
7. MOBILITY/ACCESSIBILITY	
BRDG.20	Quality of pedestrian
BRDG.21	Length of cycle-ways provided
BRDG.22	Length of new roads provided
BRDG.23	Percentage of use of public transport
BRDG.24	Number of inhabitants with access to public transport
8. SOCIAL INCLUSION	
BRDG.25	Number of inhabitants with access to services
BRDG.26	Number of inhabitants with access to social housing
9. HUMAN WELL-BEING	
BRDG.27	Number of inhabitants affected by flash flooding
BRDG.28	Number of inhabitants affected by heat waves
ECONOMIC	
10. COST OF PROPOSED DEVELOPMENT	
11. EFFECTS ON LOCAL ECONOMY (EMPLOYMENT)	
12. EFFECTS ON LOCAL ECONOMY (REVENUE)	

Tabla AI.7 Lista de indicadores en la herramienta KITCASP

Code	Policy Theme/Indicator
1. ECONOMIC COMPETITIVENESS AND RESILIENCE	
KIT.1	<i>GDP per capita/GVA per capita</i>
KIT.2	<i>Employment rate of population aged 20-64</i>
KIT.3	<i>Total R & D expenditure as % of GDP</i>
KIT.4	<i>Balance of external trade</i>
KIT.5	<i>Economic structure</i>
2. INTEGRATED SPATIAL DEVELOPMENT	
KIT.6	<i>Population density - Population change</i>
KIT.7	<i>House completions</i>
KIT.8	<i>Modal split</i>
KIT.9	<i>Land use change</i>
KIT.10	<i>Access to services (hospitals and schools)</i>
3. SOCIAL COHESION AND QUALITY OF LIFE	
KIT.11	<i>Population aged 30-34 with tertiary education</i>
KIT.12	<i>Population at risk of poverty</i>
KIT.13	<i>Green space accessibility</i>
KIT.14	<i>Well-being index</i>
KIT.15	<i>Dependency ratio</i>
4. ENVIRONMENTAL RESOURCE MANAGEMENT	
KIT.16	<i>Renewable energy production (wind, hydro, biomass, etc.)</i>
KIT.17	<i>Greenhouse gas emissions</i>
KIT.18	<i>Population at risk of flooding (living in flood-prone areas)</i>
KIT.19	<i>Number and status of protected European habitats and species</i>
KIT.20	<i>Water quality status</i>

Tabla A1.8 Lista de indicadores en la herramienta LB

Código	Categoría/Subcategoría/Indicador
1. CRITERIOS DE ACTUACIÓN SOBRE EL ENTORNO DE LA CIUDAD	
1.0. Preservar, mantener y proteger el capital natural	
LB.1	1.01. Preservar los ecosistemas existentes (naturales y artificiales)
LB.2	1.02. Respetar e integrarse en el territorio
LB.3	1.03. Conectar las diversas zonas protegidas
LB.4	1.04. Respetar el paisaje
LB.5	1.05. Conservar el suelo (reducir el consumo y preservar su productividad)
LB.6	1.06. Favorecer la producción local
2. CRITERIOS DE ACTUACIÓN EN EL ÁMBITO URBANO	
2.0. Definir una estructura y un modelo urbano más sostenible	
LB.7	2.01. Complejizar los usos del suelo
LB.8	2.02. Fomentar la compacidad urbana (densidad, edificabilidad, etc.)
LB.9	2.03. Fomentar el policentrismo
2.1. Fomentar un uso más sostenible del patrimonio edificado	
LB.10	2.11. Fomentar un uso intensivo y eficiente del patrimonio construído
LB.11	2.12. Fomentar la rehabilitación (frente a la obra nueva)
LB.12	2.13. Adoptar criterios bioclimáticos para la urbanización y la edificación
LB.13	2.14. Fomentar la diversidad de tipos residenciales
LB.14	2.15. Complejizar los usos de los edificios
2.2. Fomentar la diversidad, calidad y versatilidad de los espacios públicos urbanos	
LB.15	2.21. Eliminar barreras arquitectónicas
LB.16	2.22. Diseñar espacios multifuncionales y legibles
LB.17	2.23. Aplicar criterios bioclimáticos a los espacios abiertos
LB.18	2.24. Incorporar mobiliario urbano polivalente
LB.19	2.25. Reducir tipologías que favorezcan la privatización de los espacios abiertos
2.3. Favorecer el acceso a la naturaleza (zonas verdes)	
LB.20	2.31. Definir una superficie mínima de las zonas verdes (por persona, vivienda, etc.)
LB.21	2.32. Definir criterios de forma y tamaños mínimos para las zonas verdes
LB.22	2.33. Fomentar la biodiversidad
LB.23	2.34. Introducir redes verdes a escala de barrio y de ciudad
LB.24	2.35. Favorecer el acceso de los ciudadanos a las zonas verdes
LB.25	2.36. Incorporar elementos vegetales en los espacios públicos
LB.26	2.37. Conectar ecológicamente las distintas zonas verdes
2.4. Mejorar la accesibilidad a los equipamientos	
LB.27	2.41. Definir una oferta adecuada de equipamientos y servicios públicos
LB.28	2.42. Fomentar la proximidad a los equipamientos y dotaciones
3. CRITERIOS DE ACTUACIÓN EN TEMAS DE TRANSPORTE	
3.0. Reducir distancias	
LB.29	3.01. Asociar residencia y empleo
LB.30	3.02. Establecer plataformas logísticas de distribución en cada barrio
LB.31	3.03. Reservar espacios para comercialización de productos locales
LB.32	3.04. Reducir las infraestructuras necesarias para el funcionamiento de la ciudad
3.1. Potenciar los medios de transporte no motorizados	
LB.33	3.11. Integrar las redes peatonales y ciclistas con las zonas verdes
LB.34	3.12. Aumentar el espacio disponible para el peatón
LB.35	3.13. Construir redes peatonales y ciclistas de barrio
LB.36	3.14. Disponer aparcamientos para bicicletas
LB.37	3.15. Integrar la bicicleta con el transporte público

Tabla A1.8 Lista de indicadores en la herramienta LB (continuación)

Código	Categoría/Subcategoría/Indicador
3.2. Reducir el tráfico motorizado privado, potenciando el transporte público	
LB.38	3.21. Establecer una oferta adecuada de transporte público a escala urbana
LB.39	3.22. Construir redes integradas de transporte público
LB.40	3.23. Reducir velocidad del tráfico motorizado privado
LB.41	3.24. Reducir la superficie destinada al vehículo privado
LB.42	3.25. Restringir el uso del vehículo privado
LB.43	3.26. Limitar las plazas de aparcamiento para vehículos privados
4. CRITERIOS DE ACTUACIÓN EN CUANTO A RECURSOS	
4.0. Optimizar y reducir el consumo de energía	
LB.44	4.01. Fomentar el ahorro y promover la eficiencia energética
LB.45	4.02. Adaptar la morfología urbana a las condiciones bioclimáticas
LB.46	4.03. Aprovechar el sol y el viento en las viviendas y en los espacios exteriores
LB.47	4.04. Estructuras urbanas compatibles con sistemas centralizados de calefacción
LB.48	4.05. Fomentar el uso de energías renovables
LB.49	4.06. Fomentar la producción local de energía
4.1. Optimizar y reducir el consumo de agua	
LB.50	4.11. Reducir las pérdidas de en las redes de distribución
LB.51	4.12. Fomentar tipos edificatorios con menores demandas de agua
LB.52	4.13. Fomentar los sistemas eficientes de riego
LB.53	4.14. Incentivar la recogida de aguas pluviales en los edificios
LB.54	4.15. Utilizar sistemas de retención y filtración de aguas pluviales
LB.55	4.16. Tratar y recuperar los cauces naturales de agua
LB.56	4.17. Fomentar el empleo de pavimentos permeables
4.2. Minimizar el impacto de los materiales de construcción	
LB.57	4.21. Reducir los movimientos de tierras
LB.58	4.22. Fomentar el empleo de materiales locales
LB.59	4.23. Emplear técnicas constructivas que faciliten la reutilización
LB.60	4.24. Fomentar el empleo de materiales fácilmente reciclables
LB.61	4.25. Fomentar el uso compartido de redes de servicios
5. CRITERIOS DE ACTUACIÓN EN CUANTO A RESIDUOS	
5.0. Reducir los residuos	
LB.62	5.01. Fomentar la recogida selectiva y las redes separativas de saneamiento
LB.63	5.02. Proximidad del usuario a los sistemas de recogida
LB.64	5.03. Promover reservas para compostaje y tratamiento de residuos vegetales
LB.65	5.04. Utilizar sistemas de aprovechamiento de aguas grises
LB.66	5.05. Fomentar el reciclaje y la reutilización
5.1. Gestionar los residuos para reducir su impacto	
LB.67	5.11. Obligar al tratamiento de residuos peligrosos
LB.68	5.12. Gestión de residuos generados por la construcción y demolición
LB.69	5.13. Construir sistemas de depuración no agresivos con el entorno
LB.70	5.14. Reducir las emisiones y los vertidos contaminantes
6. CRITERIOS DE ACTUACIÓN EN TEMAS DE COHESIÓN SOCIAL	
6.0. Favorecer la cohesión del tejido social e impedir la exclusión	
LB.71	6.01. Fomentar el asociacionismo
LB.72	6.02. Reservar espacios para entidades sin ánimo de lucro
LB.73	6.03. Fomentar la complejidad social
LB.74	6.04. Fomentar la identificación de la población con su entorno (patrimonio cultural)
LB.75	6.05. Favorecer el acceso a la vivienda

Tabla AI.8 Lista de indicadores en la herramienta LB (continuación)

Código	Categoría/Subcategoría/Indicador
	6.1. Complejizar el tejido social
LB.76	6.11. Fomentar la mezcla de usos en cada barrio
LB.77	6.12. Mejorar la oferta y el acceso de servicios y equipamientos en cada barrio
LB.78	6.13. Incentivar el intercambio económico con el mundo rural
LB.79	6.14. Promover un porcentaje mínimo de actividades de proximidad
LB.80	6.15. Incentivar las actividades que favorezcan la diversidad de usos
	7. CRITERIOS DE ACTUACIÓN EN TEMAS DE GOBERNANZA
	7.0. Fomentar la transparencia administrativa
LB.81	7.01. Ofrecer acceso a la información (incluyendo datos e informes técnicos)
LB.82	7.02. Ofrecer cauces para el flujo de información en ambos sentidos
LB.83	7.03. Establecer procedimientos de cooperación entre administraciones
	7.1. Favorecer la formación de los ciudadanos
LB.84	7.11. Elaborar materiales divulgativos específicos
LB.85	7.12. Desarrollar cursos y talleres y debates de urbanismo
LB.86	7.13. Fomentar la educación y la sensibilización ambiental
LB.87	7.14. Apoyar la elaboración de Agendas 21
	7.2. Integrar la participación en el planeamiento
LB.88	7.21. En el proceso de diagnóstico
LB.89	7.22. En la toma de decisiones estratégicas
LB.90	7.23. En la redacción del plan
LB.91	7.24. En la aprobación del plan
LB.92	7.25. En el proceso de seguimiento y supervisión del plan
LB.93	7.26. Integrar las agendas 21 en el planeamiento

Tabla AI.9 Lista de indicadores en la herramienta SMIS

Código	Categoría/Subcategoría/Indicador
Code	Are/Category/Indicator
	1. OCUPACIÓN DEL SUELO
	01. Ocupación de los usos del suelo
SMIS.1	01.1 Superficie artificial por habitante
SMIS.2	01.2 Superficie artificial en relación a la superficie municipal
SMIS.3	01.3 Superficie urbanizada del término municipal
	02. Densidad de población
SMIS.4	02.1 Densidad de viviendas
SMIS.5	02.2 Densidad de población de derecho y flotante
	03. Compacidad urbana
SMIS.6	03.1 Dispersión de los núcleos de población
	04. Zonas verdes por habitante
SMIS.7	04.1 Zonas verdes públicas y ejecutadas por el planeamiento
	2. COMPLEJIDAD URBANA
	05. Complejidad urbana
SMIS.8	05.1 Número de actividades por habitante
SMIS.9	06. Equilibrio entre actividad y residencia
	3. MOVILIDAD SOSTENIBLE
	07. Distribución modal del transporte urbano
SMIS.10	07.1 Transporte modal intermunicipal
SMIS.11	07.2 Tiempo y distancia media recorrida según motivo de desplazamiento
	08. Espacio viario para peatones
SMIS.12	08.1 Proporción del número de calles con prioridad para peatones
	09. Espacio viario para bicicletas
SMIS.13	09.1 Proximidad de la población a un carril bici
	10. Espacio viario para transporte público
SMIS.14	10.1 Proximidad de la población a una parada de transporte público
SMIS.15	10.2 Número de servicios interurbanos por núcleo urbano
	4. METABOLISMO URBANO
	11. Consumo de agua urbano
SMIS.16	11.1 Pérdidas de agua en la red de distribución
	12. Depuración de las aguas residuales urbanas
SMIS.17	12.1 Porcentaje de población conectada a sistemas de saneamiento
	13. Reutilización de las aguas residuales depuradas
SMIS.18	13.1 Volumen de agua reutilizada por habitante
	14. Consumo final de energía
SMIS.19	14.1 Consumo eléctrico municipal
	15. Producción local de energías renovables
SMIS.20	15.1 Autosuficiencia energética local a partir de energías renovables
SMIS.21	16. Generación de residuos sólidos urbanos
SMIS.22	17. Recogida selectiva neta de residuos
SMIS.23	18. Emisiones de CO2 equivalente
	19. Calidad del aire
SMIS.24	19.1 Población expuesta a niveles de inmisión inferiores a 40 µg/m3
SMIS.25	20. Confort acústico

Tabla AI.9 Lista de indicadores en la herramienta SMIS (continuación)

Código	Categoría/Subcategoría/Indicador
	5. COHESIÓN SOCIAL
	21. Envejecimiento de la población
SMIS.26	21.1 Índice de segregación de las personas mayores
	22. Población de nacionalidad extranjera
SMIS.27	22.1 Índice de segregación de la población extranjera
SMIS.28	22.2 Población extranjera según procedencia
	23. Titulados superiores
SMIS.29	23.1 Índice de segregación de la población con titulación superior
	24. Población activa
SMIS.30	24.1 Tasa de paro
SMIS.31	24.2 Tasa de dependencia
	25. Autocontención laboral
SMIS.32	25.1 Autosuficiencia laboral
SMIS.33	25.2 Índice de empleo local
	26. Proximidad a servicios urbanos básicos
SMIS.34	26.1 Tiempo de acceso de la población a los servicios urbanos básicos
SMIS.35	26.2 Acceso a nuevas tecnologías
SMIS.36	27. Satisfacción de los ciudadanos con la comunidad local
	28. Tasa de asociacionismo
SMIS.37	28.1 Población asociada
	6. AUMENTO DE LA BIODIVERSIDAD
	29. Superficie de paisaje recuperado
SMIS.38	29.1 Inversión municipal proyectos de restauración y conservación ambiental
SMIS.39	30. Superficie agrícola y ganadería ecológica

Tabla AI.10 Lista de indicadores en la herramienta CGYM

Código	Área/Sub-área/Indicador
1. OCUPACIÓN DEL SUELO	
1.1 Intesidad de uso	
CGYM.1	1.1.1 Densidad de viviendas
CGYM.2	1.1.2 Compacidad absoluta
2. ESPACIO PÚBLICO Y HABITABILIDAD	
2.1 Espacio público	
CGYM.3	2.1.1 Compacidad corregida
2.1 Habitabilidad del espacio público	
CGYM.4	2.2.1 Calidad del aire
CGYM.5	2.2.2 Confort acústico
CGYM.6	2.2.3 Confort térmico
CGYM.7	2.2.4 Accesibilidad del viario
CGYM.8	2.2.5 Proporción de calle
CGYM.9	2.2.6 Percepción espacial del verde urbano
CGYM.10	2.2.7 Proximidad de la población a los servicios básicos
3. MOVILIDAD Y SERVICIOS	
3.1 Configuración de la red	
CGYM.11	3.1.1 Modo de desplazamiento de la población
CGYM.12	3.1.2 Proximidad de la población a redes de transporte público alternativas al automóvil
3.2 Funcionalidad	
CGYM.13	3.2.1 Reparto del viario público: viario peatonal - viario vehicular
CGYM.14	3.2.2 Proximidad de la población al aparcamiento para bicicletas
3.3 Infraestructuras	
CGYM.15	3.3.1 Aparcamiento para el vehículo privado fuera de la calzada
CGYM.16	3.3.2 Déficit infraestructural teórico de aparcamiento para el vehículo privado
CGYM.17	3.3.3 Operaciones de carga y descarga de mercancías fuera de la calzada
CGYM.18	3.3.4 Infraestructuras de servicios
4. COMPLEJIDAD URBANA	
4.1 Diversidad	
CGYM.19	4.1.1 Índice de diversidad urbana
CGYM.20	4.1.2 Equilibrio entre la actividad y la residencia
CGYM.21	4.1.3 Proximidad a actividades comerciales de uso cotidiano
CGYM.22	4.1.4 Actividades densas en conocimiento
4.2 Funcionalidad	
CGYM.23	4.2.1 Continuidad espacial y funcional de la calle corredor
5. ESPACIO VERDES Y BIODIVERSIDAD	
5.1 Estructura	
CGYM.24	5.1.1 Índice biótico del suelo
CGYM.25	5.1.2 Espacio verde por habitante
CGYM.26	5.1.3 Cubiertas verdes
CGYM.27	5.1.4 Proximidad de la población a espacios verdes
CGYM.28	5.1.5 Biodiversidad del arbolado
CGYM.29	5.1.6 Conectividad de los corredores verdes urbanos
5.2 Potencial	
CGYM.30	5.2.1 Índice de funcionalidad de los parques urbanos

Tabla A1.10 Lista de indicadores en la herramienta CGYM (continuación)

6. METABOLISMO URBANO	
6.1 Energía	
CGYM.31	6.1.1 Consumo energético por sectores (COe) (para tejidos urbanos consolidados).Demanda energética por sectores (para nuevos desarrollos urbanísticos)
CGYM.32	6.1.2 Producción local de energías renovables
CGYM.33	6.1.3 Autosuficiencia energética a partir de energías renovables
6.2 Agua	
CGYM.34	6.2.1 Consumo hídrico por sectores (COh) (para tejidos urbanos consolidados) Demanda hídrica por sectores (para nuevos desarrollos urbanísticos)
CGYM.35	6.2.2 Regeneración de aguas marginales
CGYM.36	6.2.3 Autosuficiencia hídrica
6.3 Alimentos	
CGYM.37	6.3.1 Autoproducción de alimentos
6.4 Residuos y materiales	
CGYM.38	6.4.1 Valorización de los residuos de la construcción y la demolición
CGYM.39	6.4.2 Recogida selectiva neta
CGYM.40	6.4.3 Dotación de contenedores de recogida selectiva
CGYM.41	6.4.4 Proximidad de la población a puntos de recogida selectiva
CGYM.42	6.4.5 Proximidad de la población a centros de recogida
CGYM.43	6.4.6 Cierre del ciclo de la materia orgánica
6.5 Atmósfera	
CGYM.44	6.5.1 Emisión de gases de efecto invernadero en la atmósfera
CGYM.45	6.5.2 Contaminación lumínica
7. COHESIÓN SOCIAL	
7.1 Mezcla de población	
CGYM.46	7.1.1 Índice de envejecimiento
CGYM.47	7.1.2 Población extranjera
CGYM.48	7.1.3 Titulados de tercer grado
7.2 Acceso a la vivienda	
CGYM.49	7.2.1 Viviendas con protección oficial
7.3 Equipamientos públicos	
CGYM.50	7.3.1 Dotación de equipamientos públicos
CGYM.51	7.3.2 Proximidad de la población a equipamientos públicos
8. FUNCIÓN GUÍA DE LA SOSTENIBILIDAD	
CGYM.52	8.1 Eficiencia del sistema urbano

Tabla AI.11. Lista de indicadores en la herramienta SEV

Código	Categoría/Indicador
1. MORFOLOGÍA URBANA	
SEV.1	1.1. Densidad edificatoria
SEV.2	1.2. Compacidad absoluta
SEV.3	1.3. Compacidad corregida
2. ESPACIO PÚBLICO Y MOVILIDAD	
SEV.4	2.1 Viario público para el tráfico del automóvil de paso y del transporte público de superficie
SEV.5	2.2 Viario público para el peatón y otros usos del espacio público
SEV.6	2.3 Continuidad de la calle corredor
SEV.7	2.4 Prohibición de condominios cerrados
SEV.8	2.5 Dotación de árboles según la proyección vertical de sombra en suelo
SEV.9	2.6 Potencial de habitabilidad térmica en espacios urbanos
SEV.10	2.7 Disposición de báculos sin contaminación lumínica
SEV.11	2.8 Diseño e introducción de las TIC en el espacio público
SEV.12	2.9 Accesibilidad a las paradas de la red de transporte público de superficie. Red segregada.
SEV.13	2.10 Accesibilidad a la red de bicicletas. Red de carriles segregada
SEV.14	2.11 Accesibilidad a plataformas logísticas subterráneas
SEV.15	2.12 Reserva de espacios de estacionamiento: vehículos privado
SEV.16	2.13 Galerías de servicios
SEV.17	2.14 Reserva de espacios de estacionamiento: bicicletas
SEV.18	2.15 Accesibilidad de los ciudadanos con movilidad reducida
3. COMPLEJIDAD	
SEV.19	3.1 La complejidad urbana (H)
SEV.20	3.2 El reparto entre actividad y residencia
SEV.21	3.3 Superficie mínima de los locales
SEV.22	3.4 La proporción de actividades de proximidad
SEV.23	3.5 Diversidad de actividades. Índice de especialización
SEV.24	3.6 La proporción de actividades densas en conocimiento. Actividades @
4. METABOLISMO URBANO	
SEV.25	4.1 Autogeneración energética de las viviendas
SEV.26	4.2 Autosuficiencia hídrica de la demanda urbana
SEV.27	4.3 Minimización de los sistemas de recogida en el espacio público. Residuos sólidos urbanos
SEV.28	4.4 Minimización y recuperación de los residuos generados en la construcción y demolición
SEV.29	4.5 Uso de materiales reutilizados, reciclados y renovables
SEV.30	4.6 Reserva de espacios para los procesos de autocompostaje y huertos urbanos
SEV.31	4.7 Reserva de espacios para la instalación de puntos limpios
SEV.32	4.8 Nivel sonoro
5. BIODIVERSIDAD	
SEV.33	5.1 Acceso de los ciudadanos a espacios verdes
SEV.34	5.2 Compensación a la impermeabilización y sellado: Índice de permeabilidad
SEV.35	5.3 Dotación de árboles en el espacio público
SEV.36	5.4 Corredores verdes
SEV.37	5.5 Una segunda capa de biodiversidad en altura: cubiertas verdes
SEV.38	5.6 Una segunda capa de biodiversidad en altura: enverdecimiento de fachadas
SEV.39	5.7 Reserva de espacio libre en interiores de manzana
SEV.40	5.8 Compacidad corregida ponderada
SEV.41	5.9 Requerimientos de espacios de estancia
6. COHESIÓN SOCIAL	
SEV.42	6.1 Acceso a los equipamientos y servicios básicos
SEV.43	6.2 Mezcla de rentas en la edificación residencial: viviendas de protección pública
7. SOSTENIBILIDAD	
SEV.44	7.1 Eficiencia del Sistema Urbano

Tabla A1.12. Lista de indicadores en la herramienta BCN

Código	Categoría/Indicador
1. TERRITORIO	
BCN.1	1.1 Ocupación urbana del suelo
BCN.2	1.2 Protección de espacios de interés natural
2. RESIDUOS	
BCN.3	2.1 Intensidad de producción de residuos de la economía local
BCN.4	2.2 Recuperación de residuos municipales
BCN.5	2.3 Utilización de los puntos limpios municipales
BCN.6	2.4 Recuperación de residuos industriales
3. ENERGIA	
BCN.7	3.1 Intensidad energética local
BCN.8	3.2 Consumo final de energía
BCN.9	3.3 Estructura urbana: desplazamiento y movilidad de la población
BCN.10	3.4 Producción de energías renovables
BCN.11	3.5 Emisión de gases con efecto invernadero
4. AGUA	
BCN.12	4.1 Intensidad de consumo de agua de la economía local
BCN.13	4.2 Abastecimiento de agua municipal

Tabla AI.13. Lista de indicadores en la herramienta BIL

Código	Categoría/Indicador
1. AGUA	
BIL.1	1. Consumo de agua
BIL.2	2. Vertidos al agua
2. ENERGÍA	
BIL.3	3. Consumo de energía
BIL.4	4. Producción y consumo de energías renovables
3. TRANSPORTE	
BIL.5	5. Movilidad local y transporte de pasajeros
BIL.6	6. Intensidad de tráfico en la red de accesos a Bilbao
BIL.7	7. Distribución de la longitud de las vías dedicadas a infraestructuras de transporte
BIL.8	8. Parque móvil
BIL.9	9. Índice de motorización
BIL.10	10. Seguridad vial
4. AIRE	
BIL.11	11. Calidad del aire urbano
5. RUIDO	
BIL.12	12. Ruido urbano
6. MEDIO NATURAL, BIODIVERSIDAD Y ZONAS VERDES	
BIL.13	13. Zonas verdes y espacios libres por habitante
BIL.14	14. Reintroducción de especies arbóreas autóctonas
BIL.15	15. Gasto municipal en medio ambiente
7. SUELO	
BIL.16	16. Uso sostenible del suelo
8. RESIDUOS	
BIL.17	17. Generación y gestión de residuos
9. ESPACIO URBANO	
BIL.18	18. Disponibilidad de zonas públicas abiertas y de servicios en el municipio
BIL.19	19. Número de viviendas protegidas terminadas anualmente
BIL.20	20. Restauración de superficies urbanas
10. ACTIVIDADES ECONÓMICAS	
BIL.21	21. Dinamismo de la economía local
BIL.22	22. Integración del medio ambiente en las actividades del municipio
BIL.23	23. Tasa de paro registrado
BIL.24	24. Vitalidad turística
11. SOCIEDAD	
BIL.25	25. Pobreza y exclusión social
BIL.26	26. Satisfacción de la ciudadanía con la comunidad local
BIL.27	27. Índice de Infancia/ Juventud/Envejecimiento y Dependencia de la población
BIL.28	28. Gasto municipal en políticas sociales
BIL.29	29. Implantación municipal en actividades de solidaridad internacional
BIL.30	30. Integración de la población inmigrante
BIL.31	31. Conocimiento del euskera
BIL.32	32. Gasto municipal y organización de actividades culturales
12. INFORMACIÓN, SENSIBILIZACIÓN Y PARTICIPACIÓN CIUDADANA	
BIL.33	33. Participación ciudadana
BIL.34	34. Educación ambiental



ANEXO II. HIPÓTESIS DE CÁLCULO

Propuesta **metodológica** para la caracterización del **comportamiento energético pasivo** del parque edificatorio **residencial** existente considerando su contexto **urbano**.

Tabla AII.1 Lista de indicadores en la herramienta LEED ND

Hipótesis	Manzana urbana	Ratio H/W	Orientación	Factor de forma	Año construcción
H1	MU ₂	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,40}	1 (<1940)
H2	MU ₂	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,40}	1 (<1940)
H3	MU ₂	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,40}	1 (<1940)
H4	MU ₂	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,40}	1 (<1940)
H5	MU ₂	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,40}	2 (1940-1959)
H6	MU ₂	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,40}	2 (1940-1959)
H7	MU ₂	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,40}	2 (1940-1959)
H8	MU ₂	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,40}	2 (1940-1959)
H9	MU ₂	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,40}	3 (1960-1979)
H10	MU ₂	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,40}	3 (1960-1979)
H11	MU ₂	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,40}	3 (1960-1979)
H12	MU ₂	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,40}	3 (1960-1979)
H13	MU ₂	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,40}	4 (1980-2006)
H14	MU ₂	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,40}	4 (1980-2006)
H15	MU ₂	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,40}	4 (1980-2006)
H16	MU ₂	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,40}	4 (1980-2006)
H17	MU ₂	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,40}	5 (2007-2013)
H18	MU ₂	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,40}	5 (2007-2013)
H19	MU ₂	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,40}	5 (2007-2013)
H20	MU ₂	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,40}	5 (2007-2013)
H21	MU ₂	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,40}	1 (<1940)
H22	MU ₂	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,40}	1 (<1940)
H23	MU ₂	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,40}	1 (<1940)
H24	MU ₂	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,40}	1 (<1940)
H25	MU ₂	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,40}	2 (1940-1959)
H26	MU ₂	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,40}	2 (1940-1959)
H27	MU ₂	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,40}	2 (1940-1959)
H28	MU ₂	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,40}	2 (1940-1959)
H29	MU ₂	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,40}	3 (1960-1979)
H30	MU ₂	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,40}	3 (1960-1979)
H31	MU ₂	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,40}	3 (1960-1979)
H32	MU ₂	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,40}	3 (1960-1979)
H33	MU ₂	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,40}	4 (1980-2006)
H34	MU ₂	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,40}	4 (1980-2006)
H35	MU ₂	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,40}	4 (1980-2006)
H36	MU ₂	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,40}	4 (1980-2006)
H37	MU ₂	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,40}	5 (2007-2013)
H38	MU ₂	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,40}	5 (2007-2013)
H39	MU ₂	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,40}	5 (2007-2013)
H40	MU ₂	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,40}	5 (2007-2013)
H41	MU ₃	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,40}	1 (<1940)
H42	MU ₃	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,40}	1 (<1940)
H43	MU ₃	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,40}	1 (<1940)
H44	MU ₃	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,40}	1 (<1940)
H45	MU ₃	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,40}	2 (1940-1959)
H46	MU ₃	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,40}	2 (1940-1959)
H47	MU ₃	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,40}	2 (1940-1959)
H48	MU ₃	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,40}	2 (1940-1959)

Tabla AII.1 Lista de indicadores en la herramienta LEED ND (continuación)

Hipótesis	Manzana urbana	Ratio H/W	Orientación	Factor de forma	Año construcción
H49	MU ₃	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,40}	3 (1960-1979)
H50	MU ₃	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,40}	3 (1960-1979)
H51	MU ₃	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,40}	3 (1960-1979)
H52	MU ₃	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,40}	3 (1960-1979)
H53	MU ₃	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,40}	4 (1980-2006)
H54	MU ₃	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,40}	4 (1980-2006)
H55	MU ₃	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,40}	4 (1980-2006)
H56	MU ₃	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,40}	4 (1980-2006)
H57	MU ₃	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,40}	5 (2007-2013)
H58	MU ₃	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,40}	5 (2007-2013)
H59	MU ₃	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,40}	5 (2007-2013)
H60	MU ₃	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,40}	5 (2007-2013)
H61	MU ₃	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,40}	1 (<1940)
H62	MU ₃	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,40}	1 (<1940)
H63	MU ₃	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,40}	1 (<1940)
H64	MU ₃	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,40}	1 (<1940)
H65	MU ₃	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,40}	2 (1940-1959)
H66	MU ₃	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,40}	2 (1940-1959)
H67	MU ₃	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,40}	2 (1940-1959)
H68	MU ₃	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,40}	2 (1940-1959)
H69	MU ₃	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,40}	3 (1960-1979)
H70	MU ₃	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,40}	3 (1960-1979)
H71	MU ₃	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,40}	3 (1960-1979)
H72	MU ₃	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,40}	3 (1960-1979)
H73	MU ₃	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,40}	4 (1980-2006)
H74	MU ₃	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,40}	4 (1980-2006)
H75	MU ₃	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,40}	4 (1980-2006)
H76	MU ₃	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,40}	4 (1980-2006)
H77	MU ₃	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,40}	5 (2007-2013)
H78	MU ₃	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,40}	5 (2007-2013)
H79	MU ₃	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,40}	5 (2007-2013)
H80	MU ₃	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,40}	5 (2007-2013)
H81	MU ₂	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,30}	1 (<1940)
H82	MU ₂	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,30}	1 (<1940)
H83	MU ₂	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,30}	1 (<1940)
H84	MU ₂	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,30}	1 (<1940)
H85	MU ₂	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,30}	2 (1940-1959)
H86	MU ₂	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,30}	2 (1940-1959)
H87	MU ₂	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,30}	2 (1940-1959)
H88	MU ₂	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,30}	2 (1940-1959)
H89	MU ₂	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,30}	3 (1960-1979)
H90	MU ₂	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,30}	3 (1960-1979)
H91	MU ₂	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,30}	3 (1960-1979)
H92	MU ₂	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,30}	3 (1960-1979)
H93	MU ₂	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,30}	4 (1980-2006)
H94	MU ₂	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,30}	4 (1980-2006)
H95	MU ₂	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,30}	4 (1980-2006)
H96	MU ₂	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,30}	4 (1980-2006)
H97	MU ₂	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,30}	5 (2007-2013)
H98	MU ₂	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,30}	5 (2007-2013)
H99	MU ₂	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,30}	5 (2007-2013)
H100	MU ₂	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,30}	5 (2007-2013)

Tabla AII.1 Lista de indicadores en la herramienta LEED ND (continuación)

Hipótesis	Manzana urbana	Ratio H/W	Orientación	Factor de forma	Año construcción
H101	MU ₂	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,30}	1 (<1940)
H102	MU ₂	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,30}	1 (<1940)
H103	MU ₂	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,30}	1 (<1940)
H104	MU ₂	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,30}	1 (<1940)
H105	MU ₂	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,30}	2 (1940-1959)
H106	MU ₂	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,30}	2 (1940-1959)
H107	MU ₂	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,30}	2 (1940-1959)
H108	MU ₂	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,30}	2 (1940-1959)
H109	MU ₂	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,30}	3 (1960-1979)
H110	MU ₂	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,30}	3 (1960-1979)
H111	MU ₂	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,30}	3 (1960-1979)
H112	MU ₂	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,30}	3 (1960-1979)
H113	MU ₂	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,30}	4 (1980-2006)
H114	MU ₂	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,30}	4 (1980-2006)
H115	MU ₂	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,30}	4 (1980-2006)
H116	MU ₂	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,30}	4 (1980-2006)
H117	MU ₂	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,30}	5 (2007-2013)
H118	MU ₂	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,30}	5 (2007-2013)
H119	MU ₂	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,30}	5 (2007-2013)
H120	MU ₂	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,30}	5 (2007-2013)
H121	MU ₃	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,30}	1 (<1940)
H122	MU ₃	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,30}	1 (<1940)
H123	MU ₃	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,30}	1 (<1940)
H124	MU ₃	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,30}	1 (<1940)
H125	MU ₃	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,30}	2 (1940-1959)
H126	MU ₃	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,30}	2 (1940-1959)
H127	MU ₃	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,30}	2 (1940-1959)
H128	MU ₃	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,30}	2 (1940-1959)
H129	MU ₃	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,30}	3 (1960-1979)
H130	MU ₃	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,30}	3 (1960-1979)
H131	MU ₃	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,30}	3 (1960-1979)
H132	MU ₃	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,30}	3 (1960-1979)
H133	MU ₃	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,30}	4 (1980-2006)
H134	MU ₃	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,30}	4 (1980-2006)
H135	MU ₃	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,30}	4 (1980-2006)
H136	MU ₃	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,30}	4 (1980-2006)
H137	MU ₃	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,30}	5 (2007-2013)
H138	MU ₃	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,30}	5 (2007-2013)
H139	MU ₃	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,30}	5 (2007-2013)
H140	MU ₃	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,30}	5 (2007-2013)
H141	MU ₃	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,30}	1 (<1940)
H142	MU ₃	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,30}	1 (<1940)
H143	MU ₃	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,30}	1 (<1940)
H144	MU ₃	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,30}	1 (<1940)
H145	MU ₃	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,30}	2 (1940-1959)
H146	MU ₃	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,30}	2 (1940-1959)
H147	MU ₃	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,30}	2 (1940-1959)
H148	MU ₃	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,30}	2 (1940-1959)
H149	MU ₃	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,30}	3 (1960-1979)
H150	MU ₃	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,30}	3 (1960-1979)
H151	MU ₃	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,30}	3 (1960-1979)
H152	MU ₃	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,30}	3 (1960-1979)

Tabla AII.1 Lista de indicadores en la herramienta LEED ND (continuación)

Hipótesis	Manzana urbana	Ratio H/W	Orientación	Factor de forma	Año construcción
H153	MU ₃	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,30}	4 (1980-2006)
H154	MU ₃	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,30}	4 (1980-2006)
H155	MU ₃	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,30}	4 (1980-2006)
H156	MU ₃	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,30}	4 (1980-2006)
H157	MU ₃	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,30}	5 (2007-2013)
H158	MU ₃	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,30}	5 (2007-2013)
H159	MU ₃	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,30}	5 (2007-2013)
H160	MU ₃	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,30}	5 (2007-2013)
H161	MU ₂	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,26}	1 (<1940)
H162	MU ₂	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,26}	1 (<1940)
H163	MU ₂	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,26}	1 (<1940)
H164	MU ₂	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,26}	1 (<1940)
H165	MU ₂	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,26}	2 (1940-1959)
H166	MU ₂	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,26}	2 (1940-1959)
H167	MU ₂	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,26}	2 (1940-1959)
H168	MU ₂	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,26}	2 (1940-1959)
H169	MU ₂	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,26}	3 (1960-1979)
H170	MU ₂	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,26}	3 (1960-1979)
H171	MU ₂	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,26}	3 (1960-1979)
H172	MU ₂	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,26}	3 (1960-1979)
H173	MU ₂	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,26}	4 (1980-2006)
H174	MU ₂	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,26}	4 (1980-2006)
H175	MU ₂	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,26}	4 (1980-2006)
H176	MU ₂	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,26}	4 (1980-2006)
H177	MU ₂	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,26}	5 (2007-2013)
H178	MU ₂	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,26}	5 (2007-2013)
H179	MU ₂	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,26}	5 (2007-2013)
H180	MU ₂	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,26}	5 (2007-2013)
H181	MU ₂	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,26}	1 (<1940)
H182	MU ₂	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,26}	1 (<1940)
H183	MU ₂	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,26}	1 (<1940)
H184	MU ₂	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,26}	1 (<1940)
H185	MU ₂	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,26}	2 (1940-1959)
H186	MU ₂	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,26}	2 (1940-1959)
H187	MU ₂	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,26}	2 (1940-1959)
H188	MU ₂	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,26}	2 (1940-1959)
H189	MU ₂	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,26}	3 (1960-1979)
H190	MU ₂	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,26}	3 (1960-1979)
H191	MU ₂	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,26}	3 (1960-1979)
H192	MU ₂	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,26}	3 (1960-1979)
H193	MU ₂	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,26}	4 (1980-2006)
H194	MU ₂	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,26}	4 (1980-2006)
H195	MU ₂	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,26}	4 (1980-2006)
H196	MU ₂	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,26}	4 (1980-2006)
H197	MU ₂	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,26}	5 (2007-2013)
H198	MU ₂	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,26}	5 (2007-2013)
H199	MU ₂	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,26}	5 (2007-2013)
H200	MU ₂	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,26}	5 (2007-2013)
H201	MU ₃	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,26}	1 (<1940)
H202	MU ₃	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,26}	1 (<1940)
H203	MU ₃	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,26}	1 (<1940)
H204	MU ₃	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,26}	1 (<1940)

Tabla AII.1 Lista de indicadores en la herramienta LEED ND (continuación)

Hipótesis	Manzana urbana	Ratio H/W	Orientación	Factor de forma	Año construcción
H205	MU ₃	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,26}	2 (1940-1959)
H206	MU ₃	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,26}	2 (1940-1959)
H207	MU ₃	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,26}	2 (1940-1959)
H208	MU ₃	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,26}	2 (1940-1959)
H209	MU ₃	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,26}	3 (1960-1979)
H210	MU ₃	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,26}	3 (1960-1979)
H211	MU ₃	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,26}	3 (1960-1979)
H212	MU ₃	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,26}	3 (1960-1979)
H213	MU ₃	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,26}	4 (1980-2006)
H214	MU ₃	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,26}	4 (1980-2006)
H215	MU ₃	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,26}	4 (1980-2006)
H216	MU ₃	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,26}	4 (1980-2006)
H217	MU ₃	H/W _{2,4}	N (0º)	S/V _{0,26}	5 (2007-2013)
H218	MU ₃	H/W _{2,4}	S (180º)	S/V _{0,26}	5 (2007-2013)
H219	MU ₃	H/W _{2,4}	E (90º)	S/V _{0,26}	5 (2007-2013)
H220	MU ₃	H/W _{2,4}	O (270º)	S/V _{0,26}	5 (2007-2013)
H221	MU ₃	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,26}	1 (<1940)
H222	MU ₃	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,26}	1 (<1940)
H223	MU ₃	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,26}	1 (<1940)
H224	MU ₃	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,26}	1 (<1940)
H225	MU ₃	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,26}	2 (1940-1959)
H226	MU ₃	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,26}	2 (1940-1959)
H227	MU ₃	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,26}	2 (1940-1959)
H228	MU ₃	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,26}	2 (1940-1959)
H229	MU ₃	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,26}	3 (1960-1979)
H230	MU ₃	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,26}	3 (1960-1979)
H231	MU ₃	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,26}	3 (1960-1979)
H232	MU ₃	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,26}	3 (1960-1979)
H233	MU ₃	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,26}	4 (1980-2006)
H234	MU ₃	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,26}	4 (1980-2006)
H235	MU ₃	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,26}	4 (1980-2006)
H236	MU ₃	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,26}	4 (1980-2006)
H237	MU ₃	H/W _{1,2}	N (0º)	S/V _{0,26}	5 (2007-2013)
H238	MU ₃	H/W _{1,2}	S (180º)	S/V _{0,26}	5 (2007-2013)
H239	MU ₃	H/W _{1,2}	E (90º)	S/V _{0,26}	5 (2007-2013)
H240	MU ₃	H/W _{1,2}	O (270º)	S/V _{0,26}	5 (2007-2013)



ANEXO III. ANÁLISIS DETALLADO DE LA DEMANDA DE REFRIGERACIÓN

Propuesta **metodológica** para la caracterización del **comportamiento energético pasivo** del parque edificatorio **residencial** existente considerando su contexto **urbano**.

III.1 INTRODUCCIÓN

Los valores resultantes de las simulaciones energéticas realizadas en la Etapa II del caso de aplicación, adoptan valores próximos a 0 en relación a la demanda energética de refrigeración (DE_r). Como se observa en la Figura 6.3 del Capítulo 6, la demanda de refrigeración es menor en los edificios más antiguos. Este Anexo tiene por objeto indagar en los motivos que provocan este hecho y justificar la afirmación proporcionada en el apartado 6.2.2 de dicho capítulo, que responsabiliza a la inercia térmica del cerramiento de fachada de la envolvente térmica y a la presencia de obstáculos solares en el entorno urbano, de los bajos valores de la variable respuesta DE_r .

III.2 INFLUENCIA DE LA INERCIA TÉRMICA

Para identificar las causas que provocan este comportamiento, se recurre al análisis de las temperaturas a las que se encuentra el aire interior, exterior y los cerramientos:

- Temperatura del aire (θ_a): es la temperatura media del aire interior de la estancia.
- Temperatura radiante (θ_r): es la temperatura media radiante de los cerramientos de la zona.
- Temperatura operativa (θ_o): se calcula como la media aritmética entre la temperatura interior del aire y la temperatura radiante de los cerramientos. Esta constituye un índice de bienestar de las personas que ocupan el interior de un edificio, puesto que su confort térmico no sólo depende de la temperatura interior del aire de las estancias, sino también de la temperatura a la que se encuentran los cerramientos (fachada, suelo, cubierta, etc.):

$$\theta_{op} = \frac{\theta_a + \theta_r}{2}$$

- Temperatura exterior de bulbo seco (θ_{bs}): temperatura exterior según los datos climáticos del lugar.

Para realizar dicho análisis, se toma como ejemplo la hipótesis H82 (MU_1 , ancho de calle 10 m, orientación S, tipología edificatoria $PF_{M(\leq 4)}$, periodo de construcción 1). En las tres tipologías de edificios la tendencia en el comportamiento es muy similar, por lo que las conclusiones son aplicables en los tres casos. Al observar la evolución de las horas de desconfort a lo largo de todo un año (ver Figura AIII.1), se aprecia que el periodo más confortable es el estival (de junio a septiembre), concretamente el mes de agosto, donde se registran únicamente 221 horas de desconfort para el total de los 31 días del mes. La θ_{bs} es de 24,48°C y la θ_o es de 23,16°C. Dado que la temperatura operativa de 23,16°C es inferior a la temperatura de consigna de 25°C establecida para verano (a partir de la cual los sistemas activos de acondicionamiento serían necesarios), no existe apenas demanda energética de refrigeración. Las 221 horas de desconfort corresponden a las horas durante los 31 días del mes, en las que la temperatura operativa supera los 25°C de consigna, momentos en los que sí existe una pequeña demanda de refrigeración.

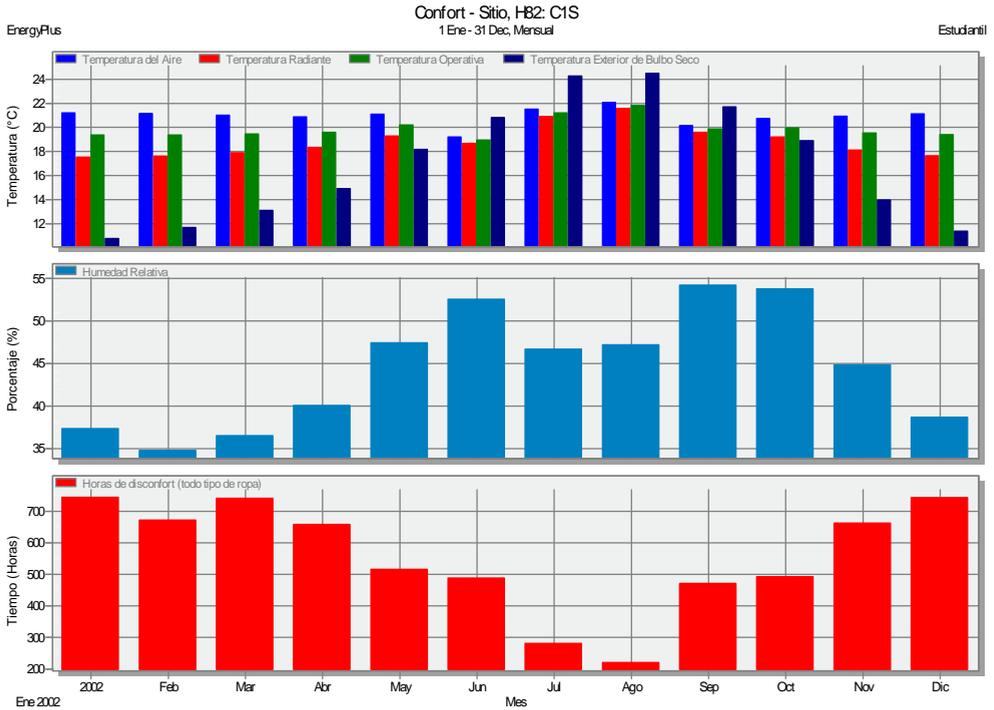


Figura AIII.1 Resultados de confort térmico para la H82

Este fenómeno puede ser explicado por la inercia térmica de los cerramientos de la envolvente. Si analizamos los resultados del balance térmico en la H82 (ver Figura AIII.2), observamos que la mayor parte de la energía se pierde a través de fachadas (denominado como muros en dicha figura), seguida de los acristalamientos, las cubiertas y los suelos. La infiltración supone pérdidas térmicas durante los meses del periodo infracalentado (de octubre a mayo), que se traducirán en aportes necesarios en forma de calor para suplirlas. En los meses de verano (de junio a septiembre) se traducen en ganancias también indeseadas, que contribuirán a aumentar la demanda energética de refrigeración.

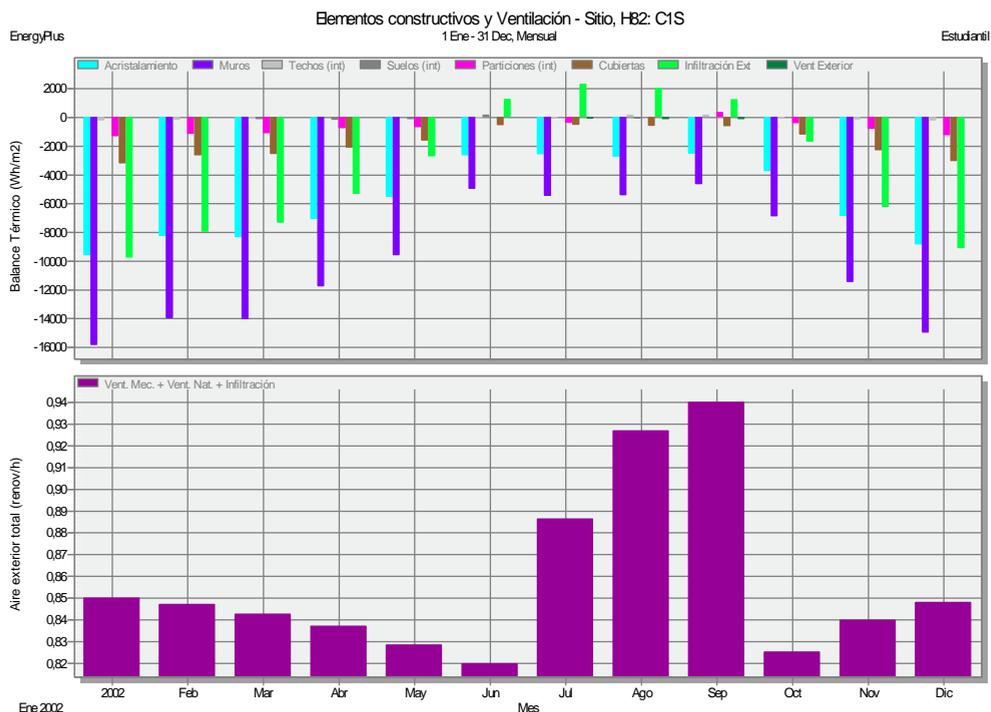


Figura AIII.2 Resultados del balance térmico en la H82

Analizado esto, se concluye que el cerramiento de la envolvente que más impacto tiene en las pérdidas energéticas es la fachada, por lo que el efecto de la inercia térmica de esta no pasará, probablemente, desapercibida y merece ser estudiada, pues puede explicar la baja demanda de refrigeración en el periodo estival.

Los parámetros que caracterizan el comportamiento de un cerramiento frente a variaciones de temperatura en el exterior son el desfase térmico (en horas) y la amortiguación de la onda térmica (%).

El desfase de la onda térmica (d_t) se aprecia claramente en los procesos de calentamiento solar de las fachadas y de las cubiertas. Una vez que la capa externa del cerramiento se ha calentado por la acción conjunta de la radiación solar y de la temperatura exterior, comienza un lento proceso de paso del calor por conducción desde esta capa hacia el interior del muro. El tiempo que tarda la onda de calor en atravesar el cerramiento se denomina desfase de onda térmica (Neila González, 2004).

Cuando las condiciones exteriores cambian (cesa la radiación solar y baja la temperatura exterior), parte del calor acumulado en el cerramiento se transmite hacia el exterior, produciéndose un rebote de la onda de calor. A este fenómeno se le conoce como amortiguación de la onda térmica (f_a) (Neila González, 2004).

El cálculo de ambos fenómenos se describe a continuación:

- Desfase térmico (d_t , h): depende de la conductividad térmica (λ), de la densidad (ρ), del espesor (e), del calor específico (c_e) y del periodo del fenómeno (t), que para aplicaciones

climáticas es de 24 horas (1 día). El desfase es función de la difusividad térmica (a), la cual mide la velocidad de calentamiento y se expresa en (m²/s x10⁻⁶). El desfase y la difusividad se calculan mediante las expresiones:

$$d_f = \frac{23,0790 \cdot e}{\sqrt{a}} \quad a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_e}$$

- Amortiguación de la onda térmica (f_a, %): depende de la efusividad térmica (b), que es la capacidad efectiva que ofrecen los materiales para acumular calor (en s^{1/2}W/m²°C), y para un periodo de 24 horas se calcula mediante las expresiones:

$$f_a = 1 - e^{\left(\frac{-0,006b \cdot e}{\lambda}\right)} \quad b = \sqrt{\rho \cdot c_e \cdot \lambda}$$

La solución de fachada en el periodo constructivo 1 (anterior a 1940) está constituida por una gruesa fábrica de ladrillo cerámico de 1 pie de espesor. La Tabla AIII.1 muestra el cálculo de la inercia térmica para esta solución constructiva.

Tabla AIII.1 Cálculo de la inercia térmica de la fachada considerada en el periodo temporal 1 (anterior a 1940)

Capa	e (m)	λ (W/mK)	P (kg/m ³)	c _e (K/kgK)	A (m ² /s·10 ⁻⁶)	b (s ^{1/2} W/m ² °C)	d _f (h)	f _a de cada capa (tanto por uno)	Amort. sobre la energía que traspasa	Energía que traspasa
Mortero cemento	0,015	0,550	1125,000	1000,000	0,488	786,600	0,495	0,121	-	1,121=0,879
Ladrillo cerámico perforado	0,240	0,550	1125,000	1000,000	0,488	786,600	7,928	0,872	0,872x0,879=0,766	0,879-0,766=0,113
Yeso	0,015	0,570	1150,000	1000,000	0,495	809,600	0,492	0,119	0,233x0,119=0,028	0,113-0,028=0,085
							8,915			1-0,085= 0,915

El desfase de la onda térmica es de 8,915 horas y la amortiguación total es del 91,5%. Estos valores se traducen en que la temperatura máxima de calor en un día de agosto, que se da en horas de mediodía, no llegará hasta casi 9 horas más tarde al interior del edificio, cuando ya es posible evacuar el calor por ventilación natural. Mediante este razonamiento, puede decirse que el cerramiento posee una muy buena inercia térmica que permite mantener una temperatura constante en el interior del edificio y reducir así la demanda de refrigeración hasta valores casi nulos.

Con un análisis más detallado de la hipótesis, hora a hora, se puede observar qué ocurre durante el día en el que se registra la máxima temperatura en el mes de agosto. Las horas después del mediodía en las que se da la máxima temperatura exterior de bulbo seco (5:00 pm, 36,10°C), marcan el inicio de la acumulación térmica en el cerramiento. Con el desfase de casi 9 horas, el calor no llegaría a atravesarlo hasta entrada la noche (00:00-2:00 pm, 3h de desconfort), cuando ya es posible evacuarlo de forma natural mediante ventilación nocturna.

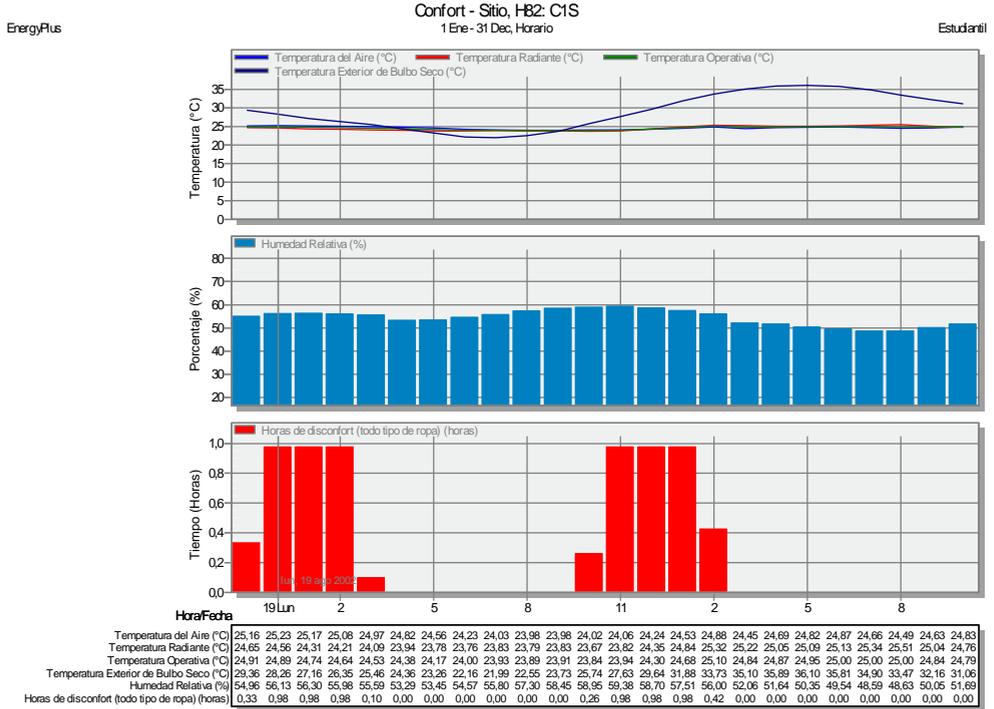


Figura AIII.3 Resultados horarios de confort en el día de máxima θ_{bs} para la H82

Se puede concluir que el elevado espesor de la fábrica y la alta densidad de la misma, hacen que se aproveche excepcionalmente bien la inercia térmica del cerramiento, manteniendo la temperatura operativa interior alrededor de la temperatura de consigna de verano. Ello impide que las temperaturas altas exteriores se transfieran hacia el interior del edificio, evitando así situaciones de disconfort y haciendo prácticamente nula la demanda de refrigeración.

Como se apunta anteriormente y como se observa en la Figura AIII.3, la demanda de refrigeración aumenta en edificios de construcción más reciente. Aunque no supone una demanda energética de refrigeración elevada (valor máximo registrado de 5,58 kWh/m²año), esta es bastante superior a la de los edificios más antiguos. Las soluciones constructivas actuales, de construcción ligera, tienen menor inercia térmica que limita el fenómeno anterior, lo que hace aumentar la demanda de refrigeración del edificio. Además, el tipo de construcción más hermética (ventanas de mejores prestaciones, juntas entre elementos constructivos mejor resueltas, etc.) hace reducir las infiltraciones, lo que también contribuye a reducir las renovaciones/hora y, por tanto, aumentar la DE_r.

III.3 INFLUENCIA DE LOS OBSTÁCULOS SOLARES DEL ENTORNO

Por otro lado, las condiciones de soleamiento y sombra del propio entorno del edificio, tienen también obviamente influencia sobre la demanda energética del edificio. Con la finalidad de analizar el efecto de las sombras del entorno en dicha demanda, se realiza una nueva simulación del edificio

de la H82 suponiéndolo aislado. La Figura AIII.4 y la Figura AIII.5 muestran la evolución de la DE_r y DE_c.

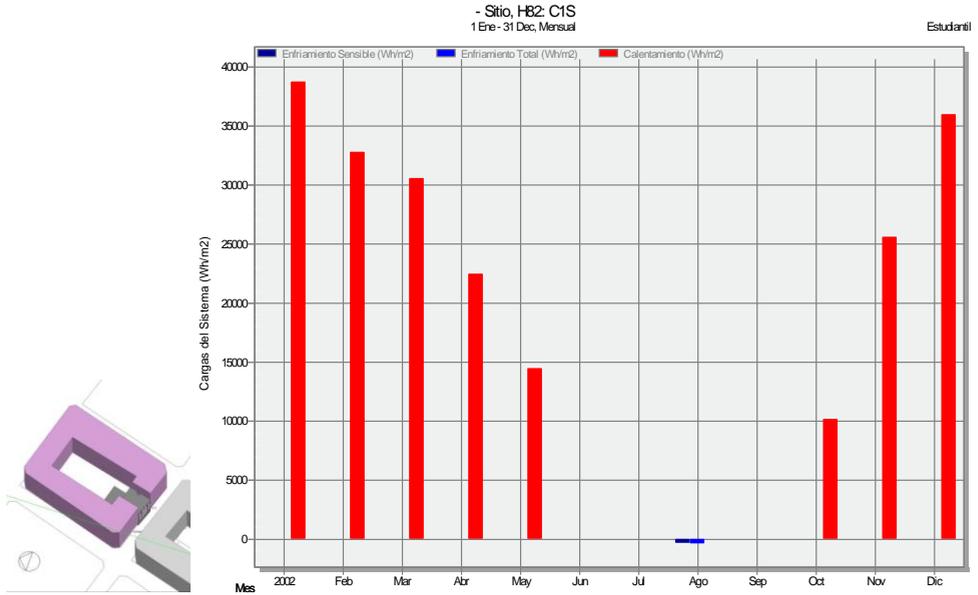


Figura AIII.4 Resultados de demandas energéticas mensuales para la H82

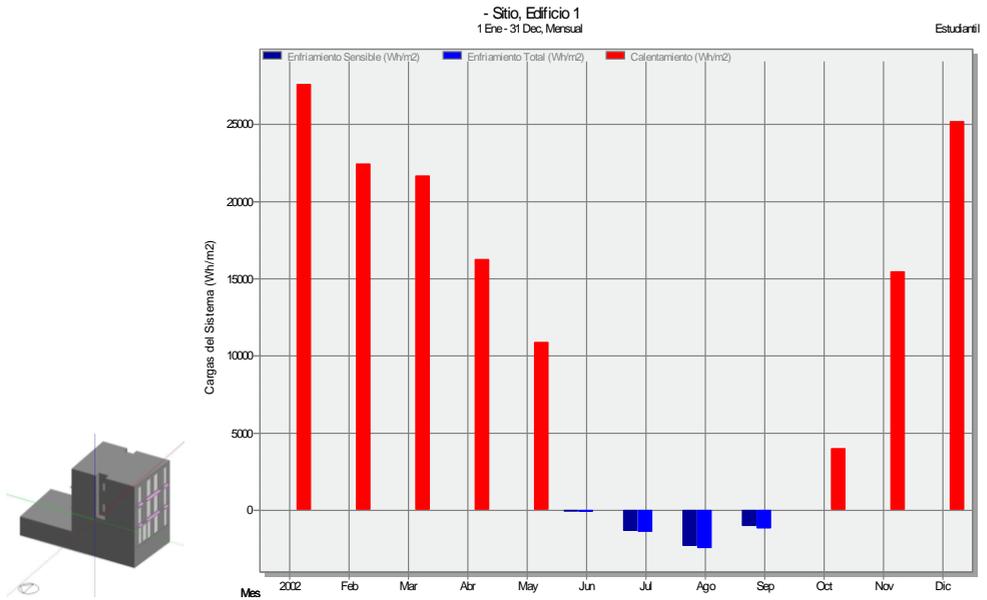


Figura AIII.5 Resultados de demandas energéticas mensuales para la H82, suponiendo el edificio aislado

Tabla AIII.2 Comparativa de demandas energéticas entre H82 y edificio aislado

	DE_r [kWh/m ² año]	DE_c [kWh/m ² año]
H82	0,47875	210,63353
H82, edificio aislado	5,27452	143,42367

La Tabla AIII.2 compara la DE_r y DE_c de ambas hipótesis, de la que se pueden observar dos aspectos. El primero, que la demanda de refrigeración aumenta cuando el edificio se encuentra aislado, pues este carece de elementos que obstaculicen la radiación solar, lo que resulta perjudicial durante los meses de verano. Y, el segundo, que la demanda de calefacción disminuye cuando el edificio está aislado, ya que todas las fachadas del edificio tienen accesibilidad solar, reduciendo así su demanda energética durante el invierno.

III.4 REFERENCIAS

Neila González, J. (2004). *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*. ISBN: 84-89150-64-8. Munilla-Lería.