

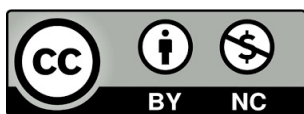
Carlos Beltrán Velamazán

Modelado urbano de consumo
energético en edificación basado
en datos abiertos e IA para el
diagnóstico del parque edificado
europeo: el caso de España

Director/es

Monzón Chavarrías, Marta
López Mesa, María Belinda

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>



Universidad de Zaragoza
Servicio de Publicaciones

ISSN 2254-7606

Tesis Doctoral

MODELADO URBANO DE CONSUMO
ENERGÉTICO EN EDIFICACIÓN BASADO EN
DATOS ABIERTOS E IA PARA EL DIAGNÓSTICO
DEL PARQUE EDIFICADO EUROPEO: EL CASO DE
ESPAÑA

Autor

Carlos Beltrán Velamazán

Director/es

Monzón Chavarrías, Marta
López Mesa, María Belinda

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
Escuela de Doctorado

Programa de Doctorado en Nuevos Territorios en la Arquitectura

2025

Tesis Doctoral

Modelado urbano de consumo energético en
edificación basado en datos abiertos e IA para
el diagnóstico del parque edificado europeo:
el caso de España

Autor

Carlos Beltrán Velamazán

Directoras

Belinda López Mesa

Marta Monzón Chavarriás

Universidad de Zaragoza

2025

Agradecimientos

Una tesis doctoral aporta a la comunidad científica un nuevo conocimiento objetivo. Este pequeño apartado reconoce, sin embargo, su aportación personal en una comunidad mucho más reducida de personas. Su brevedad le obliga a una exposición imposible, pero consigue algo muy especial: da valor a ese vínculo tan humano que es el agradecimiento. Se trata por tanto de un apartado imprescindible, fugaz e inabarcable, como son nuestras emociones.

Entre estas personas quiero destacar a mis directoras, Belinda López y Marta Monzón, por su inmensa comprensión y paciencia, su trabajo incansable y todo lo que han aportado tanto a esta tesis como a mi propia formación como investigador y persona.

A mis compañeras de Construcciones Arquitectónicas, sobre todo a Marta Gómez, por las mil aventuras vividas como compañeros de doctorado y por las que quedan por venir, y a Almudena Espinosa, por su apoyo constante y sus ánimos en el transcurso de esta tesis.

A Mari Beni por contagiarme su pasión por la sostenibilidad y su entusiasmo al transmitirla a los estudiantes.

A mis padres, a mi hermano y a María, porque esta tesis es un fruto más de nuestra historia donde todos hemos creído siempre en cada uno de nosotros.

A mis amigos, especialmente a Abel, Saba, Manu, Javier y Fernando por su amistad, su confianza y sus valiosos consejos a lo largo de esta aventura, que han sido un faro en esta travesía.

A todos los miembros del Laboratory of Urban Energy Systems del EMPA, y en particular a Kristina Orehounig, por la fantástica experiencia vivida durante la estancia de investigación.

A todos los que, de una u otra forma, han contribuido a que esta tesis vea la luz: ¡Gracias, gracias y gracias!

Resumen

La descarbonización del parque edificado es fundamental para combatir el cambio climático. Para alcanzar este objetivo, resulta imprescindible evaluar su estado actual, medir su potencial de rehabilitación y desarrollar estrategias basadas en datos. En este contexto, los indicadores de progreso solicitados por la Comisión Europea juegan un papel clave al proporcionar parámetros para valorar el avance de la descarbonización y rehabilitación del parque construido. Sin embargo, la falta de información detallada sobre las características y el comportamiento energético de los edificios representa un desafío importante.

Frente a esta situación, esta tesis propone un enfoque innovador basado en el uso de datos en abierto y nuevas tecnologías para automatizar la recolección y el procesamiento de información. Herramientas como los Sistemas de Información Geográfica, Big Data, la automatización de procesos y la Inteligencia Artificial (IA) permiten recopilar, integrar y analizar grandes volúmenes de datos sobre el parque edificado, de forma que se consiga obtener información valiosa, útil y actualizada.

Este enfoque se desarrolla mediante la creación de metodologías para generar Modelos Urbanos de Energía en Edificios (UBEM) a escala nacional de forma automática y eficiente. La primera metodología se basa en los Certificados de Eficiencia Energética (CEE) y otros datos en abierto, lo que permite establecer un modelo nacional con todos los edificios de España y el comportamiento energético de los que disponen de un certificado. Esto proporciona una visión integral del estado de los edificios y ayuda a reducir tiempos y costes computacionales en su evaluación.

Para ampliar la información disponible, se ha desarrollado un segundo modelo denominado nUBEM. Este modelo utiliza técnicas de IA para aprender a partir del anterior basado en CEE y extrapolar información energética a los edificios sin certificación. Mediante el aprendizaje automático, el nUBEM analiza las características físicas y geoespaciales de las edificaciones, generando estimaciones del consumo de energía primaria no renovable y de las emisiones de gases de efecto invernadero. Así, se evalúa el rendimiento energético a gran escala, superando las limitaciones derivadas de la escasez de datos.

Ambos modelos son pioneros: el UBEM basado en CEE es el primero a escala nacional de su tipo, mientras que el nUBEM constituye la primera aplicación de IA para predecir el comportamiento energético de edificios a gran escala.

La integración de estas metodologías con el uso de datos en abierto y tecnologías crea un marco que mejora la capacidad para evaluar el estado del parque edificado y medir el progreso en la descarbonización. Estos avances permiten mapearlo y analizarlo de forma continua y apoyar la toma de decisiones basadas en datos.

En la tesis se demuestra la viabilidad y eficacia de ambos modelos, abriendo el camino hacia futuras investigaciones en la descarbonización y rehabilitación energética del parque edificado. La combinación de innovación tecnológica y datos abiertos se perfila como una estrategia prometedora para enfrentar los desafíos energéticos actuales, contribuyendo significativamente a la transformación sostenible del entorno urbano.

Abstract

The decarbonization of the built environment is essential in the fight against climate change. Achieving this objective requires assessing its current state, measuring its rehabilitation potential, and developing data-driven strategies. In this context, the progress indicators mandated by the European Commission play a key role by providing metrics for evaluating the advancement of decarbonization and renovation of the building stock. However, the lack of detailed information on building characteristics and energy performance represents a significant challenge.

In response to this situation, the thesis proposes an innovative approach based on the use of open data and new technologies to automate the collection and processing of information. Tools such as Geographic Information Systems, Big Data analytics, process automation, and Artificial Intelligence (AI) facilitate the collection, integration, and analysis of large volumes of data regarding the building stock, thereby yielding valuable, useful and up-to-date information.

This approach is developed through the creation of methodologies to automatically and efficiently generate Urban Building Energy Models (UBEMs) at a national scale. The first methodology is based on Energy Performance Certificates (EPCs) and other open data, enabling the creation of a national model encompassing all buildings in Spain and detailing the energy performance of those that possess a certificate. This model provides a comprehensive view of the state of the buildings and contributes to reducing computational time and costs in the evaluation of the building stock.

To expand the available information, a second model, named nUBEM, has been developed. This model employs AI techniques to learn from the EPC-based model and extrapolate energy information to uncertified buildings. Through machine learning, the nUBEM analyzes the physical and geospatial characteristics of buildings, generating estimates of non-renewable primary energy consumption and greenhouse gas emissions. In this manner, it facilitates large-scale evaluation of energy performance, overcoming the limitations arising from data scarcity.

Both models are pioneering: the EPC-based UBEM represents the first national model of its kind, while the nUBEM constitutes the first application of AI to predict the energy performance of buildings on a large scale. The integration of these methodologies with the use of open data and advanced technologies creates a framework that enhances the capacity to assess the state of the building stock and measure progress in decarbonization. These advances enable continuous mapping and analysis of the building stock, thereby supporting data-driven decision-making.

The thesis demonstrates the viability and effectiveness of both models, paving the way for future research in the decarbonization and energy renovation of the building stock. The combination of technological innovation and open data emerges as a promising strategy to address current energy challenges, significantly contributing to the sustainable transformation of the urban environment.

Índice de la tesis

Resumen	1
Abstract	3
Índice de la tesis	5
Índice de tablas	11
Índice de figuras	14
Glosario de abreviaturas	17
Prólogo	19
1. Introducción	29
1.1. Justificación de la investigación	31
1.1.1. Justificación científica de la investigación	32
1.1.2. Estado de la cuestión	35
1.2. Hipótesis de trabajo	43
2. Objetivos y metodología	45
2.1. Objetivos generales y preguntas de investigación	47
2.2. Metodología de investigación	48
2.3. Estructura de la investigación	50
3. Base teórica y estado del arte	53
3.1. Estado del arte de los indicadores de progreso	55
3.1.1. El estado de la edificación y el progreso en la rehabilitación del parque edificado en Europa y España	55
3.1.2. Evolución de los marcos europeos de indicadores de progreso	58
3.1.3. Estado de los indicadores de progreso en Europa	62
3.1.4. Estado de los indicadores de progreso en España	65
3.1.5. Metodología para analizar la calidad de los indicadores de progreso en España	66
3.1.6. Análisis de los indicadores de progreso en España y su disponibilidad	68
3.2. Estado del arte de los indicadores de progreso físicos y energéticos	73
3.2.1. Indicadores de características físicas en edificación	74
3.2.2. Indicadores de características energéticas en edificación	75

3.3. Oportunidades en el Open Big Data y los modelos UBEM para responder al reto del desarrollo de los indicadores de progreso	76
3.3.1. Calidad de los datos para el desarrollo de indicadores	77
3.3.2. Directivas e iniciativas europeas para promover los datos en abierto	78
3.3.3. Fuentes de datos nacionales en abierto provenientes de directivas europeas	80
3.3.4. Nuevos avances en tecnologías	89
3.3.5. Potencial de los Urban Building Energy Models (UBEM)	94
4. Modelo UBEM nacional basado en Certificados de Eficiencia Energética (CEE)	107
4.1. Objetivo: Creación de un modelo nacional empleando datos en abierto	109
4.2. Creación de un modelo UBEM a escala nacional basado en CEE	111
4.3. Propuesta de metodología para generar un UBEM basado en CEE y otros datos en abierto	112
4.4. Datos empleados	116
4.4.1. Certificados de Eficiencia Energética	117
4.4.2. Catastro INSPIRE	121
4.4.3. Catastro alfanumérico	122
4.4.4. Modelo Digital del Terreno	124
4.4.5. Estadísticas nacionales	127
4.5. Proceso de extracción, transformación y carga	130
4.6. Tratamiento de los datos	131
4.6.1. Tratamiento de los CEE	131
4.6.2. Tratamiento de datos alfanuméricos del catastro nacional	132
4.6.3. Gestión de datos del catastro INSPIRE	135
4.6.4. Tratamiento de datos adicionales	136
4.7. Generación del modelo	137
4.7.1. Generación del modelo de comportamiento energético	138
4.7.2. Generación del modelo GIS nacional del parque edificado	139
4.7.3. Generación del UBEM nacional basado en CEE	140
4.8. Validación y aplicación del modelo	140
4.8.1. Características del UBEM basado en CEE de España	140
4.8.2. Validación del modelo	142
4.8.3. Utilidad del modelo	145
4.9. Discusión y conclusiones	150
4.9.1. Limitaciones del modelo	151

4.9.2. Conclusiones	153
5. Predicción del comportamiento energético del parque edificado sin certificar: modelo nUBEM	155
5.1. Objetivo: Uso del ML para extender la información al total de los edificios de España	157
5.2. Propuesta de una metodología basada en Machine Learning (ML) para abarcar todos los edificios de España	160
5.2.1. Selección del caso de estudio	161
5.2.2. Recopilación preliminar de datos	161
5.2.3. Adición de variables geoespaciales	162
5.2.4. Selección del algoritmo de IA	163
5.2.5. Entrenamiento y prueba de los modelos	165
5.2.6. Validación del modelo	166
5.2.7. Aplicabilidad del modelo	170
5.3. Validación y aplicación del modelo	172
5.3.1. Elección del algoritmo	172
5.3.2. Evaluación del modelo	172
5.3.3. Aplicabilidad del modelo	179
5.4. Discusión	186
5.4.1. Variables clave en el modelo predictivo	187
5.4.2. Limitaciones del modelo	189
5.6. Conclusiones del modelo	190
6. Aplicabilidad de los modelos	193
6.1. Indicadores incluidos en la EPBD de 2024	195
6.1.1. Número de edificios y superficie total: por tipo de edificio	197
6.1.2. Número de edificios y superficie total: por clase de eficiencia energética	200
6.1.3. Número de edificios y superficie total: edificios de consumo de energía casi nulo	201
6.1.4. Número de edificios y superficie total: edificios menos eficientes	203
6.1.5. Número de edificios y superficie total: el 43 % de los edificios residenciales menos eficientes	205
6.1.6. Número de edificios y superficie total: edificios de uso religioso	206
6.1.7. Número de edificios y superficie total: por antigüedad del edificio	206
6.1.8. Número de edificios y superficie total: por tamaño del edificio	207

6.1.9. Número de edificios y superficie total: por zona climática	208
6.1.10. Número de edificios y superficie total: demoliciones	211
6.1.11. Número de certificados de eficiencia energética: por tipo de edificio	211
6.1.12. Número de certificados de eficiencia energética: por clase de eficiencia energética	213
6.1.13. Número de certificados de eficiencia energética: por período de construcción	214
6.1.14. Tasas de renovación anuales: número y superficie total	215
6.1.15. Consumo anual de energía primaria y final: por tipo de edificio	215
6.1.16. Consumo anual de energía primaria y final: por uso final	217
6.1.17. Ahorro de energía: edificios residenciales, no residenciales, edificios públicos	217
6.1.18. Uso medio de energía primaria en kWh/(m ² a) para edificios residenciales	217
6.1.19. Reducción de los costes energéticos por hogar	219
6.1.20. Consumo de energía primaria del 15% y del 30% de los edificios más eficientes	219
6.1.21. Cuota de las instalaciones de calefacción en el sector de la construcción por tipo de caldera/instalación de calefacción	220
6.1.22. Emisiones de gases de efecto invernadero operativas anuales kg de CO _{2eq} /(m ² a): por tipo de edificio	220
6.1.23. Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero operativas anuales: por tipo de edificio	221
6.1.24. PCG a lo largo del ciclo de vida en edificios nuevos: por tipo de edificio	222
6.1.25. Pobreza energética: Porcentaje de personas afectadas por la pobreza energética	222
6.1.26. Factores de energía primaria	222
6.1.27. Definición de edificio de consumo de energía casi nulo para edificios nuevos y existentes	223
6.1.28. Nivel óptimo de rentabilidad de los requisitos mínimos de eficiencia energética para edificios nuevos y existentes	223
6.1.29. Objetivos en relación con las tasas de renovación anuales: número y superficie total: por tipo de edificio	224
6.1.30. Objetivos en relación con las tasas de renovación anuales: número y superficie total: edificios menos eficientes	231
6.1.31. Objetivos en relación con las tasas de renovación anuales: número y superficie total: el 43 % de los edificios residenciales menos eficientes	231
6.1.32. Otros indicadores	231

6.2. Análisis del parque edificado	233
6.2.1. Desglose de datos del parque edificado por zona climática y tipo de edificio. Cantidad y comportamiento energético.	234
6.2.2. Comportamiento energético del parque edificado	235
6.2.3. Análisis del parque edificado rural y urbano	243
6.2.4. Análisis del estado de la certificación energética	262
6.3. Aplicaciones del modelo a escala urbana. El caso de estudio de Zaragoza	267
7. Conclusiones y futuras líneas de investigación	271
7.1. Conclusiones principales	273
7.2. Potenciales desarrollos de la investigación y Open Science	279
7.2.1. Código y datos en abierto	279
7.2.2. Herramienta completa	280
7.2.3. Mapa web	281
7.3. Limitaciones	281
7.4. Líneas de investigación futuras	283
7.4.1. Escalabilidad del modelo	283
7.4.2. Hacia un catastro energético	284
7.4.3. Hacia un catastro solar	285
7. Conclusions and Future Research	287
7.1. Main Conclusions	289
7.2. Potential Developments of the Research and Open Science	294
7.2.1. Open Code and Data	295
7.2.2. Complete Tool	295
7.2.3. Web Map	296
7.3. Limitations	297
7.4. Future Research Lines	298
7.4.1. Model Scalability	298
7.4.2. Towards an Energy Cadastre	299
7.4.3. Towards a Solar Cadastre	300
Anexos	303
Anexo A	305
A.1 Evolución de los marcos de indicadores de la EPBD	305
A.2 Indicadores solicitados en la EPBD de 2024 aportados en las LTRS nacionales	305
Anexo B	306

B.1 Indicadores de progreso de la EPBD de 2024	306
Anexo C	315
C.1 Datos obtenidos de cada fuente de información	315
C.2 Datos obtenidos en cada modelo basado en CEE	316
C.3 Tabla estándar de datos de los CEE	317
C.4 Desglose de datos ofrecidos por el catastro INSPIRE	318
C.5 Desglose de datos ofrecidos por el catastro alfanumérico	319
C.6 Criterios empleados para filtrar CEE	321
C.7 Información ampliada del paso B.1.2: Detección de valores atípicos en los CEE	322
C.8 Número y porcentajes de CEE válidos tras el filtrado	323
C.9 Número y porcentajes de CEE válidos tras el filtrado	324
Anexo D	324
D.1 Análisis comparativo del modelo nUBEM con otros modelos en base a sus objetivos, método de generación, resultados, alcance y reproducibilidad	324
Anexo E	330
E.1 Desglose del número de edificios, superficie construida, número de viviendas y número de bienes inmuebles en el parque edificado nacional	330
Referencias	353

Índice de tablas

Tabla 1. Relación entre los objetivos, los métodos y la estructura de la tesis.	51
Tabla 2. Tasa anual de rehabilitación de edificios y viviendas en el medio rural.	58
Tabla 3. Comparación de los marcos de indicadores de progreso a lo largo de su evolución en las EPBD.	60
Tabla 4. Estructura y número de indicadores obligatorios y opcionales del Anexo II del texto refundido de la EPBD de 2024.	61
Tabla 5. Datos abiertos identificados en España, fuente pública y directiva europea relacionada.	81
Tabla 6. Datos empleados, fuentes de información, tipo de datos ofrecidos y su frecuencia de actualización.	116
Tabla 7. Comunidades Autónomas en España que ofrecen los Certificados de Eficiencia Energética en bases de datos en abierto.	118
Tabla 8. Información de los CEE proporcionada en abierto por cada Comunidad Autónoma.	119
Tabla 9. Formatos y codificaciones de los archivos de CEE por Comunidad Autónoma.	120
Tabla 10. Clasificación por número de habitantes en los municipios.	128
Tabla 11. Duración del proceso de generación automática de los modelos.	142
Tabla 12. Consumo de tiempo para leer los archivos de los modelos y tamaño de los archivos generados.	143
Tabla 13. Comparación del número de edificios, viviendas y bienes inmuebles entre el modelo basado en CEE a escala nacional y las estadísticas oficiales.	143
Tabla 14. Comparación del porcentaje de edificios con diferentes clases energéticas entre nuestro modelo y los datos oficiales.	145
Tabla 15. Desempeño de los diferentes algoritmos.	172
Tabla 16. Comparación de Modelos UBEM según su Propósito de acuerdo con [29], Número de Edificios, Escala y Precisión Obtenida para Valores Individuales y Agregados Totales.	177
Tabla 17. Número de edificios, superficie construida, CEPNR promedio kWh/(m ² año) y CEPNR total kWh/año por clase de rendimiento energético en España.	182
Tabla 18. Número de edificios, superficie construida, emisiones de GEI promedio kgCO ₂ /(m ² año) y emisiones de GEI totales kgCO ₂ /año por clase de emisiones de GEI en España.	183
Tabla 19. Valor límite del CEPNR para considerar un edificio entre el 43% de los edificios con peor comportamiento energético en cada zona climática de España.	184

Tabla 20. Número de edificios, superficie construida, CEPNR promedio y total, emisiones promedio de GEI y emisiones totales por tipo de edificio residencial según la ERESEE.	185
Tabla 21. Número de edificios y superficie total por tipo de edificio y periodo de construcción.	198
Tabla 22. Número de edificios y superficie total por uso principal del edificio.	199
Tabla 23. Indicadores de progreso: Número de edificios y superficie total por clase emisiones de GEI.	201
Tabla 24. Valor límite $C_{ep,nren,lim}$ para uso residencial privado para ser considerado EECN.	202
Tabla 25. Valor límite de CEPNR del 15% de los edificios residenciales con peor comportamiento energético por zona climática.	204
Tabla 26. Valor límite del 43% de los edificios residenciales con peor comportamiento energético por zona climática	205
Tabla 27. Número de edificios y superficie total por antigüedad del edificio.	206
Tabla 28. Número de edificios y superficie total por tamaño del edificio.	208
Tabla 29. Número de edificios y superficie total por zona climática.	209
Tabla 30. Número de certificados de eficiencia energética: por tipo de edificio.	212
Tabla 31. Número de certificados de eficiencia energética: por clase de eficiencia energética.	213
Tabla 32. Número de certificados de eficiencia energética: por período de construcción.	214
Tabla 33. Consumo de energía primaria no renovable por tipo de edificio.	216
Tabla 34. Consumo de energía primaria no renovable medio por zona climática en edificios residenciales.	218
Tabla 35. Consumo de energía primaria no renovable de un edificio que forme parte del 15 % y 30% de los edificios más eficientes desde el punto de vista energético	219
Tabla 36. Emisiones de gases de efecto invernadero operativas anuales kg de $CO_{2eq}/(m^2a)$ por tipo de edificio	221
Tabla 37. Valores límite del 16% y del 26% de CEPNR en kWh/m ² a para uso no residencial.	226
Tabla 38. Consumo medio de energía primaria no renovable según se rehabilite el parque residencial menos eficiente	230
Tabla 39. Número de edificios en España por zona climática de invierno y periodo de construcción.	237
Tabla 40. Superficie edificada en España de usos que requieren de climatización por zona climática de invierno y periodo de construcción.	237

Tabla 41. Número de edificios certificados en España por zona climática de invierno y periodo de construcción.	238
Tabla 42. CEPNR medio en España por zona climática de invierno y periodo de construcción.	238
Tabla 43. Emisiones de GEI medias en España por zona climática de invierno y periodo de construcción.	239
Tabla 44. Número de viviendas principales, secundarias y vacías por tamaño de municipio.	245
Tabla 45. Porcentaje de viviendas principales, secundarias y vacías.	246
Tabla 46. Número de viviendas por clúster y tamaño de municipio.	254
Tabla 47. Número de viviendas principales por clúster y tamaño de municipio.	256
Tabla 48. Proporción de edificios certificados frente al total de edificios del periodo de construcción.	266
Tabla A.1. Evolución de los marcos de indicadores de progreso.	305
Tabla A.2. Comparación entre los indicadores aportados en las LTRS de los EM y los del texto refundido de la EPBD de 2024.	305
Tabla C.1. Datos obtenidos de cada fuente de información.	315
Tabla C.2. Datos obtenidos en los tres modelos.	316
Tabla C.6. Criterios empleados para detectar CEE con valores atípicos.	321
Tabla C.7. Criterios para rechazar CEE debidos a información incorrecta.	322
Tabla C.8. Porcentaje de CEE válidos en cada CA tras aplicar los criterios de detección de valores atípicos.	323
Tabla D.1. Comparación del modelo nUBEM con otros modelos en base a sus objetivos, escala, enfoque, datos de entrada y si requiere clasificar por arquetipos o calibración.	324
Tabla D.2. Comparación del modelo nUBEM con otros modelos en base a su resolución espacial, tipo de datos de entrada, resultados, esfuerzo computacional y reproducibilidad.	327
Tabla E.1. Número de edificios, superficie construida, número de viviendas, bienes inmuebles y edificios con certificados de eficiencia energética por tipo de edificio y zona climática.	330
Tabla E.2. Consumo de energía primaria no renovable y emisiones de gases de efecto invernadero medias y medianas por tipo de edificio y zona climática.	341

Índice de figuras

Figura 1. Número de publicaciones científicas por año que incluyen los términos descarbonización y edificios o rehabilitación.	34
Figura 2. Evolución de las estrategias y directivas relacionadas con la eficiencia energética en la edificación.	37
Figura 3. Evolución de las emisiones de GEI provenientes del uso de energía fósil en el sector de la edificación en los EM: cambio porcentual (2005-2022) y futuras tendencias si solo se mantienen las medidas existentes y si se implementan las medidas adicionales.	57
Figura 4. Evolución del número de indicadores por dominio en los avances de la directiva europea.	61
Figura 5. Número de indicadores de progreso aportados por los países de la UE en sus LTRS.	63
Figura 6. Esquema de análisis de la viabilidad de desarrollo de los indicadores.	68
Figura 7. Porcentaje de indicadores completamente obtenibles, potencialmente desarrollables y no disponibles por área temática.	71
Figura 8. Esquema de las diferentes metodologías para generar modelos UBEM.	99
Figura 9. Documentos publicados anualmente en el campo de los UBEM.	102
Figura 10. Principales publicaciones indexadas en Scopus en el campo de los UBEM.	102
Figura 11. Principales palabras clave empleadas en el campo de los UBEM.	103
Figura 12. Descripción de la metodología general para elaborar el Modelo UBEM a escala nacional basado en CEE.	113
Figura 13. Flujo de trabajo de la metodología específica para elaborar el modelo UBEM a escala nacional basado en CEE aplicada al caso de España.	115
Figura 14. Izquierda: Modelo Digital de Superficie del área de Oerlikon, Suiza. Derecha: Modelo Digital de Elevaciones del mismo lugar.	124
Figura 15. Nube de puntos del área de Oerlikon, Suiza generada a través de datos LiDAR.	125
Figura 16. Mapa de zonas climáticas de España.	127
Figura 17. Mapa de España por tamaño de municipio.	129
Figura 18. Ejemplo de una parcela para ilustrar la relación entre las categorías catastrales alfanuméricas (en negro) y las dos escalas de datos basadas en los CEE en el modelo UBEM (en rojo).	134
Figura 19. Edificios georreferenciados en España con su zona climática.	140
Figura 20. UBEM a escala nacional basado en CEE.	141
Figura 21. Edificios del centro de Barcelona clasificados según el consumo de energía primaria no renovable (CEPNR) por metro cuadrado.	141

Figura 22. Consumo de energía primaria no renovable (panel superior, a) y emisiones de GEI (panel inferior, b) del parque edificado de España por metro cuadrado, zona climática y año de construcción.	146
Figura 23. Consumo de energía primaria no renovable del parque edificado residencial (panel izquierdo, a) y no residencial (panel derecho, b) de España, por metro cuadrado y año, en áreas urbanas y rurales, por comunidad autónoma.	147
Figura 24. Emisiones de GEI del parque edificado residencial (panel izquierdo, a) y no residencial (panel derecho, b) de España, por metro cuadrado y año, en áreas urbanas y rurales, por comunidad autónoma.	148
Figura 25. Número y porcentaje de CEE, número y porcentaje de inmuebles certificados, área certificada y porcentaje de área certificada, y número y porcentaje de edificios completos certificados, clasificados por clase energética y uso.	149
Figura 26. Número de CEE disponibles cada año en las bases de datos abiertas en España.	151
Figura 27. Esquema de funcionamiento del modelo.	162
Figura 28. Rangos de CEPNR para la clasificación energética de edificios plurifamiliares en climas peninsulares según la legislación española.	171
Figura 29. Mapa de calor comparando los datos reales, obtenidos de los CEE, y predichos de CEPNR.	174
Figura 30. Mapa de calor comparando los datos reales, obtenidos de los CEE, y predichos de emisiones de GEI.	175
Figura 31. Edificios residenciales en España con un CEE disponible en bases de datos abiertas (izquierda) y Edificios residenciales en España predichos utilizando el modelo nUBEM (derecha).	179
Figura 32. Vista detallada del modelo nUBEM en Madrid.	181
Figura 33. Ganancias totales de las principales variables de entrada del modelo.	188
Figura 34. Mapa de zonas climáticas y edificios de España.	210
Figura 35. CEPNR por zona climática y periodo de construcción.	235
Figura 36. Emisiones de GEI por zona climática y periodo de construcción.	236
Figura 37. Diagrama de cajas de los rangos de CEPNR por zona climática en España.	240
Figura 38. Gráfica de la relación entre el CEPNR medio y las emisiones de GEI medias por zona climática y tipo de edificio.	241
Figura 39. Consumo de energía primaria no renovable por tipo de edificio y Comunidad Autónoma.	243
Figura 40. Porcentaje de viviendas unifamiliares y plurifamiliares por tamaño de municipio.	244
Figura 41. Porcentaje de viviendas principales, secundarias y vacías por tamaño de municipio.	247

Figura 42. Porcentaje de viviendas por alturas del edificio por tamaño de municipio.	248
Figura 43. Porcentaje de viviendas según su año de construcción por tamaño de municipio.	249
Figura 44. Porcentaje de viviendas principales según superficie útil de vivienda por tamaño de municipio.	250
Figura 45. Porcentaje de viviendas principales grandes (mayores de 120 m ²), medianas (mayores de 75 y hasta 120 m ²) o pequeñas (de 75 m ² o menores), por tamaño de municipio.	251
Figura 46. Superficie útil media por tamaño de municipio de las viviendas principales.	252
Figura 47. Porcentaje de los clústeres de vivienda por tamaño de municipio.	253
Figura 48. Porcentaje de los clústeres de vivienda principal por tamaño de municipio.	253
Figura 49. CEPNR medio por m ² de vivienda y por tamaño de municipio.	257
Figura 50. CEPNR medio por vivienda principal por tamaño de municipio.	258
Figura 51. Consumo energético total del parque residencial español de viviendas principales para los diferentes tamaños de municipio.	259
Figura 52. Emisiones de GEI medias por tamaño de municipios.	259
Figura 53. Emisiones de GEI del parque residencial español de viviendas principales por tamaño de municipios.	260
Figura 54. Izquierda: Consumo de Energía Primaria No Renovable en núcleos urbanos y rurales por Comunidad Autónoma. Derecha: Emisiones de GEI medias en núcleos urbanos y rurales por Comunidad Autónoma.	262
Figura 55. Número y porcentaje de CEE, inmuebles y superficie certificada por clase de emisiones de GEI y uso residencial y no residencial.	263
Figura 56. Distribución de las clases de emisiones de GEI de los CEE por Comunidad Autónoma.	264
Figura 57. Distribución de las clases de emisiones de GEI de los CEE por periodo de construcción.	265
Figura 58. Modelo nacional desarrollado y vista de Zaragoza.	267
Figura 59. Distribución del consumo de energía primaria no renovable por tipología de edificio y periodo de construcción.	268
Figura 60. Distribución del consumo de energía primaria no renovable en bloques de 4 o más plantas en Zaragoza clasificadas por periodo de construcción.	270
Figura 61. Interfaz gráfica de usuario de la herramienta para generar el modelo basado en CEE y datos en abierto.	280
Figura 62. Versión inicial del mapa interactivo.	281

Glosario de abreviaturas

En el texto de la tesis doctoral se emplean múltiples abreviaturas para referirse a ciertas normativas o términos extensos empleados frecuentemente. Aunque en general se han empleado las siglas en español, algunas se han mantenido en inglés porque son más frecuentemente empleadas en la literatura científica.

Siglas	Términos
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
API	Interfaz de Programación de Aplicaciones (Application Programming Interface)
BBDD	Bases de Datos
BEM	Modelo de Energía de Edificios (Building Energy Models)
BIM	Modelado de Información de Construcción (Building Information Modelling)
BIP	Blended Intensive Programme
BPIE	Buildings Performance Institute Europe
CA	Comunidad Autónoma
CC	Creative Commons license
CCAA	Comunidades Autónomas
CEE / EPC	Certificado de Eficiencia Energética / Energy Performance Certificate
CEPNR / NRPEC	Consumo de Energía Primaria No Renovable / Non-Renewable Primary Energy Consumption
CESAR-P	Combined Energy Simulation And Retrofit in Python
CNIG	Centro Nacional de Información Geográfica
CO ₂	Dióxido de carbono
CTE	Código Técnico de la Edificación
CV(RMSE)	Coefficiente de Variación del Error Cuadrático Medio (Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error)
DB-HE	Documento Básico de Ahorro de Energía
DBL	Libro Digital del Edificio (Digital Building Logbook)
EEA	European Environment Agency
EECN	Edificios de Consumo de Energía Casi Nulo
EED	Directiva de Eficiencia Energética (Energy Efficiency Directive)
EIF	European Interoperability Framework
EM / MS	Estados miembros (de la Unión Europea) / Member States
EPBD	Directiva de Eficiencia Energética de los Edificios (Energy Performance of Buildings Directive)
ERESEE	Estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España
ETL	Extracción, Transformación y Carga (Extract, Transform, Load)
GEI / GHG	Gases de Efecto Invernadero / Greenhouse Gas
GIS	Sistemas de Información Geográfica (Geographic Information System)
GNU GLP	General Public License
IA / AI	Inteligencia Artificial / Artificial Intelligence
IGN	Instituto Geográfico Nacional
INE	Instituto Nacional de Estadística
INSPIRE	Infrastructure for Spatial Information in Europe

IoT	Internet de las Cosas
ktep	kilotonelada equivalente de petróleo
LTRS	Estrategia de Rehabilitación a Largo Plazo (Long-Term Renovation Strategies)
MDE	Modelo Digital de Elevaciones (Digital Elevation Model)
MDS	Modelo Digital de Superficie (Digital Surface Model)
MDT / DTM	Modelo Digital del Terreno / Digital Terrain Model
MEPS	Estándares Mínimos de Eficiencia Energética (Minimum Energy Performance Standards)
ML	Aprendizaje automático (Machine Learning)
NMBE	Error Medio Normalizado de Sesgo (Normalized Mean Bias Error)
nUBEM	Modelo Urbano de Energía en Edificios a escala nacional (national scale Urban Building Energy Model)
nZEB	Edificios de consumo de energía casi nulo (Nearly Zero Energy Buildings)
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU	Organización de las Naciones Unidas
OPEP	Organización de Países Exportadores de Petróleo
PCG	Potencial de Calentamiento Global
PNIEC	Planes Nacionales Integrados de Energía y Clima
PNRE	Planes Nacionales de Renovación de Edificios
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PSI	Public Sector Information
R ²	Coefficiente de Determinación (Coefficient of Determination)
SDI	European Union Spatial Data Infrastructure
SRC	Sistema de Referencia de Coordenadas
SVM	Máquinas de Vector Soporte (Support-Vector Machines)
TABULA	Typology Approach for Building Stock Energy Assessment
UBEM	Modelo Urbano de Energía en Edificios (Urban Building Energy Model)
UE	Unión Europea
UNIZAR	Universidad de Zaragoza
XGBoost	eXtreme Gradient Boosting
XML	eXtensible Markup Language
ZC	Zona Climática
ZEB	Edificios de Consumo de Energía Nulo (Zero Energy Buildings)

Prólogo

Prólogo

Esta tesis doctoral se ha desarrollado dentro del programa de doctorado ‘Nuevos Territorios en la Arquitectura’ de la Universidad de Zaragoza y como parte del proyecto de investigación ‘Metodología multi-criterio para la evaluación de estrategias locales de rehabilitación de la vivienda bajo la perspectiva de Ciclo de Vida’, denominado LocalREGEN, de la convocatoria Retos de Investigación 2019. Es un proyecto coordinado compuesto por dos subproyectos, que realizan el grupo de investigación Built4Life Lab de la Universidad de Zaragoza (UNIZAR) y el grupo de investigación CAVIAR de la Universidad del País Vasco. El subproyecto coordinador, al que se adscribe esta tesis, ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y la Agencia Estatal de Investigación con el código PID2019-104871RB-C21/AEI/10.13039/501100011033.

Dentro de este subproyecto, el doctorando ha contado con un Contrato de Personal Investigador en Formación financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y la Agencia Estatal de Investigación, dentro del programa de Ayudas para contratos predoctorales para la formación de doctores: PRE2020-093441 financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033.

Durante el transcurso de la tesis, el doctorando ha realizado una estancia de investigación de cuatro meses en 2022 en el EMPA (*Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology*), en el *Laboratory of Urban Energy Systems*, en Zurich (Suiza), bajo la dirección de la Dra. Kristina Orehounig. Durante la estancia se pudo conocer de primera mano la investigación que realiza el laboratorio sobre simulación energética y sistemas urbanos de energía, donde han creado un modelo denominado *Combined Energy Simulation And Retrofit in Python* (CESAR-P) para simular energéticamente los edificios de Suiza.

También dentro de la investigación ha realizado en 2022 un Blended Intensive Programme (BIP) (cursos de formación sobre temas específicos que se desarrollan en estancias cortas de movilidad) titulado: *DataSun Scientific School - Data Sciences for Solar Energy*, organizado por la Université Savoie Mont Blanc y el Institut National de l'Énergie Solaire en Francia. El BIP estuvo centrado en el uso de herramientas de análisis de datos para el cálculo de la producción fotovoltaica. El BIP fue financiado a través de una beca ERASMUS+.

Entre 2020 y 2022, dentro de la formación del doctorando, cursó el máster de dos años de duración (120 ECTS) denominado *Scuola di Specializzazione in beni architettonici e del paesaggio* en la Università degli Studi di Ferrara (Italia), con el Trabajo de Fin de Máster *Il palazzo della famiglia Luna a Daroca. Analisi di un palinsesto edilizio tra mantenimento e rivelazione*, obteniendo una puntuación en el máster de 30 sobre 30.

Actualmente, está colaborando dentro de la *Cost Action CA21103*, denominada *CircularB – Implementation of Circular Economy in the Built Environment*, dentro del grupo 3 *Advancing Circular Building KPIs: A Comprehensive Review Towards Dashboard Implementation*, centrado en Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en edificación, y se están elaborando unas publicaciones científicas.

En el transcurso de la tesis doctoral ha formado parte de dos iniciativas, denominadas RuralREGEN y sensorEMMELINE.

El proyecto RuralREGEN, ‘Estudio sobre el estado de la rehabilitación energética de viviendas en el ámbito rural en España: diagnóstico, barreras y soluciones’, ha consistido en un análisis multidimensional de las características del parque edificado en zonas rurales y de su población, el estado de las ayudas a la rehabilitación y las barreras presentes en la rehabilitación de las zonas rurales. Dentro de este proyecto ha participado en el análisis de las características de las viviendas rurales, generando modelos georreferenciados a escala nacional para poder mapear y analizar cómo es el comportamiento energético y las emisiones de CO₂ en el mundo rural.

Asimismo, ha participado en el estudio denominado sensorEMMELINE, en el marco del proyecto LocalREGEN, fruto de un convenio de colaboración entre la Universidad de Zaragoza y la Sociedad Municipal Zaragoza Vivienda. El estudio ha consistido en la monitorización de viviendas sociales en alquiler, antes y después de su rehabilitación, para conocer los beneficios energéticos y de confort obtenidos al rehabilitar energéticamente las viviendas y conseguir unos protocolos de monitorización de viviendas sociales de alquiler. Se trabajó en la fase de monitorización y en el análisis de los datos mediante programación.

Durante los cursos 2022/2023, 2023/2024 y 2024/2025 ha participado en la docencia universitaria en la Universidad de Zaragoza, impartiendo 60 horas de docencia al año, repartidas entre:

- el Máster Universitario en Arquitectura en la asignatura de Técnica y materia: generación del proyecto y rehabilitación.
- el Grado en Estudios en Arquitectura entre la optativa transversal de 5º curso: Historia de la tecnología y de la construcción arquitectónica y la asignatura obligatoria de 3º curso titulada Acondicionamiento y servicios 1.

En dichos cursos se obtuvo la evaluación de positiva destacada.

Adicionalmente, ha participado en el programa tutor-mentor de UNIZAR, como tutor del primer curso del Grado en Estudios en Arquitectura en los mismos tres años, obteniendo una evaluación positiva destacada.

Durante el curso académico 2023-2024, participó en el Proyecto de Innovación Docente titulado ‘Diseño del marco formativo y evaluador de la Competencia Transversal de la Universidad de Zaragoza: RD1. Democracia y Sostenibilidad en las titulaciones de la EINA’, con código id 4587, programa PICT, bajo la coordinación de la profesora María Benita Murillo Esteban. En el marco de este proyecto, se incorporaron los temas de Democracia y Sostenibilidad al contenido de la asignatura Acondicionamiento y servicios 1. Los resultados fueron muy positivos, reflejados tanto en la capacidad del alumnado para profundizar en los temas, obteniendo mejores resultados en los exámenes y en los trabajos de la asignatura, como en las encuestas de satisfacción de la asignatura. La metodología y los resultados alcanzados se han publicado en diversas comunicaciones en congresos académicos.

El doctorando impartió en 2024 una clase de dos horas de duración en el Máster Universitario en Ordenación Territorial y Medio Ambiental de la Universidad de Zaragoza con el título ‘Midiendo el progreso de la descarbonización del parque residencial español’, dentro de la asignatura ‘Los sistemas inter e intraurbanos en la articulación del territorio’.

Asimismo, impartió en 2023 una clase de dos horas de duración en el Máster Universitario en Gestión de Patrimonio Cultural de la Universidad de Zaragoza con el título ‘Investigación para la restauración: el caso del Palacio de los Luna, Daroca’, dentro de la asignatura ‘Conservación y Restauración del Patrimonio Cultural’.

En el transcurso de la tesis doctoral ha realizado un total de 12 cursos para profundizar en diferentes aspectos de la investigación desarrollada, entre los cuales cabe destacar:

- Curso avanzado de Sistemas de Información Geográfica. Impartido por la Universidad de Burgos, con una duración de 30 horas. Realizado en 2020.
- Curso de Introducción a la programación científica con Python. Impartido por el Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones de la Universidad de Zaragoza, con una duración de 15 horas. Realizado en 2022.
- Curso de Visualización de Datos Urbanos, Ojo al dato 2023. Impartido por la Fundación Zaragoza Ciudad del Conocimiento, con una duración de 48 horas. Realizado en 2023.
- Curso de Introducción a la ingeniería de software. Impartido por el Departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas de la Universidad de Zaragoza, con una duración de 20 horas. Realizado en 2024.

- Curso de Life-cycle assessment, Construction LCA bootcamp. Impartido por One Click LCA, con una duración de 10 horas. Realizado en 2024.

Ha evaluado seis artículos de investigación para diferentes revistas científicas: Applied Energy JCR Q1 JIF 10.1; dos en Sustainable Cities and Society JCR Q1 JIF 10.5; Earth Science Informatics JCR Q2 JIF 2.7; SN Business & Economics; Environment, Development and Sustainability JCR Q2 JIF 4.7.

El desarrollo de la tesis ha dado lugar a las siguientes publicaciones hasta enero de 2025:

Artículos en revistas indexadas:

- Beltrán Velamazán, C.; Monzón Chavarriás, M.; López Mesa, B. A Method for the Automated Construction of 3D Models of Cities and Neighborhoods from Official Cadaster Data for Solar Analysis. *Sustainability (Switzerland)* **2021**, *13*, 6028. <https://doi.org/10.3390/su13116028>. JCR Q2 JIF 3.9.
- Beltrán Velamazán, C.; Gómez Gil, M.; López Mesa, B.; Monzón Chavarriás, M.; González González, F. Comparison of Frameworks for the Assessment of Decarbonisation of European National Building Stocks. *Environmental and Climate Technologies* **2023**, *27*, 506-515. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2023-0037>. JCR Q4 JIF 1.4.
- Beltrán Velamazán, C.; Monzón Chavarriás, M.; López Mesa, B. A New Approach for National-Scale Building Energy Models Based on Energy Performance Certificates in European Countries: The Case of Spain. *Heliyon* **2024**, *10*, e25473. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25473>. JCR Q1 JIF 3.4.
- Beltrán Velamazán, C.; Gómez Gil, M.; Monzón Chavarriás, M.; Espinosa Fernández, A.; López Mesa, B. Harnessing Open European Data for a Data-Driven Approach to Enhancing Decarbonization Measurement in the Built Environment. *Environmental and Climate Technologies* **2024**, *28*, 776-793. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2024-0060>. JCR Q4 JIF 1.4.
- Beltrán Velamazán, C.; Monzón Chavarriás, M.; López Mesa, B. Predicting Energy and Emissions in Residential Building Stocks: National UBEM with Energy Performance Certificates and Artificial Intelligence. *Applied Sciences* **2025**, *15*, 514. <https://doi.org/10.3390/app15020514>. JCR Q1 JIF 2.5.

Comunicaciones en congresos:

- Beltrán Velamazán, C.; Monzón Chavarrias, M.; López Mesa, B. Revisión del estado actual de desarrollo de los indicadores de progreso en las Estrategias nacionales a largo plazo para la Rehabilitación. En *X Jornada de Jóvenes Investigadores e Investigadoras del I3A*, Zaragoza, España, 21 de octubre de 2021. ISSN 2341-4790. <https://doi.org/10.26754/jjii3a.20216008>.
- Beltrán Velamazán, C.; González González, F. J.; López Mesa, B.; Espinosa Fernández, A.; Monzón Chavarrias, M. Revisión del estado actual de desarrollo de los indicadores de progreso en rehabilitación en Europa. En *Convención Internacional de la Arquitectura Técnica (CONTART 2022)*, Toledo, España, 12-13 de mayo de 2022. ISBN: 978-84-09-40591-6.
- Beltrán Velamazán, C.; Monzón Chavarrias, M.; López Mesa, B. Estimación del potencial solar de las cubiertas y fachadas de ciudades desde modelos 3D y desde modelos GIS bidimensionales en España. En *International Conference on Energy Efficiency and Sustainability in Architecture and Urbanism (EESAP 13)*; San Sebastián, España, 5 de octubre de 2022; pp. 112–125. ISBN 978-84-1319-499-8.
- Beltrán Velamazán, C.; Gómez Gil, M.; López Mesa, B.; Monzón Chavarrias, M.; González González, F. Analysis of Frameworks for the Assessment of the Building Stock Decarbonisation in Europe. En *CONNECT. International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies*, 10-12 May 2023, Riga, Latvia. ISSN: 2592-9704, <https://doi.org/10.7250/CONNECT.2023.115>.
- Beltrán Velamazán, C.; Gómez Gil, M.; Monzón Chavarrias, M.; Espinosa Fernández, A.; López Mesa, B. Measuring the Decarbonisation Progress of Buildings Based on European Open Big Data. En *CONNECT. International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies*, 15-17 May 2024, Riga, Latvia. ISBN 978-9934-37-065-6. <https://doi.org/10.7250/CONNECT.2024.015>.
- Beltrán Velamazán, C.; López Mesa, B.; Gómez Gil, M.; Murillo Esteban, M.B. Formación en Democracia y Sostenibilidad en el Grado de Arquitectura de la Universidad de Zaragoza. En *8th International Virtual Conference on Educational Research and Innovation*; Adaya Press, REDINE, Eds.; 22-23 May 2024; pp. 393–398. ISBN: 978-84-126060-2-7. <https://doi.org/10.58909/adc24377766>.
- Beltrán Velamazán, C.; Monzón Chavarrias, M.; López Mesa, B. Caracterización energética del parque edificado español a escala nacional a partir de datos en abierto: el caso de Zaragoza. En *Jornada de Jóvenes Investigadores del I3A*; Zaragoza, España, 26 de junio de 2024. <https://doi.org/10.26754/jjii3a.202410593>.

- Murillo Esteban, M.B.; Bernués del Río, E.; Callejas Bermejo, A.; Beltrán Velamazán, C.; Pérez Monge, M.; Fernández Navajas, J.; et al. Diseño del marco formativo de la competencia transversal de la UZ (RD1) Democracia y Sostenibilidad en las titulaciones de la EINA. En *XVII Jornadas de Innovación Docente e Investigación Educativa de la Universidad de Zaragoza*; Vicerrectorado de Política Académica de la Universidad de Zaragoza, Ed.; Universidad de Zaragoza: Zaragoza, España, 16-17 de enero de 2025; pp. 103–104. ISBN 978-84-09-67873-0. <https://doi.org/10.26754/uz.978-84-09-67873-0>.
- Bernués del Río, E.; Murillo Esteban, M.B.; Beltrán Velamazán, C.; Resano Ezcaray, J.; Briz Velasco, J.L.; Ilarri Artigas, S.; et al. Experiencias Piloto en la impartición de la competencia RD1 en APC de la EINA. En *XVII Jornadas de Innovación Docente e Investigación Educativa de la Universidad de Zaragoza*; Vicerrectorado de Política Académica de la Universidad de Zaragoza, Ed.; Universidad de Zaragoza: Zaragoza, España, 16-17 de enero de 2025; pp. 105–106. ISBN 978-84-09-67873-0. <https://doi.org/10.26754/uz.978-84-09-67873-0>.
- Leindecker, G.; Beltrán Velamazán, C.; Gómez Gil, M.; Pesta, J.; Trubina, N. A Decision-Support Tool for Analyzing Transport Impacts in Building Life Cycle Assessment. En *Central Europe towards Sustainable Building 2025*; Prague, Czech Republic, (aceptada, en prensa).

Capítulos de libro:

- Beltrán-Velamazán, C.; Monzón-Chavarriás, M.; López-Mesa, B. Clasificación y caracterización del parque habitacional en zonas rurales. En *RuralREGEN Estudio sobre el estado de la rehabilitación energética de viviendas en el ámbito rural en España: diagnóstico, barreras y soluciones*; ECODES - Fundación Ecología y Desarrollo: Madrid, España, 2022; pp. 17–38. ISBN 978-84-18321-64-1. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.20360.80647>.
- Beltrán-Velamazán, C.; Gómez-Gil, M.; López-Mesa, B. Analysis of Institutional Frameworks of Indicators to Measure the Effectiveness of Building Renovation Policy and Decarbonization Progress in Europe. En *Assessing Progress in Decarbonizing Spain's Building Stock: Indicators and Data Availability*; López-Mesa, B., Oregi, X., Eds.; Springer Nature Switzerland: Cham, Switzerland, 2024; pp. 17–55. ISBN 978-3-031-51829-4. https://doi.org/10.1007/978-3-031-51829-4_2.
- Beltrán-Velamazán, C.; Arbulu, M.; Gómez-Gil, M.; Rueda-Esteban, M.; Espinosa-Fernández, A.; López-Mesa, B. Indicators and Data in Spain Regarding an Overview of Worst Performing Segments of the National Building Stock, Rented Properties and Energy Poverty. En *Assessing*

Progress in Decarbonizing Spain's Building Stock: Indicators and Data Availability; López-Mesa, B., Oregi, X., Eds.; Springer Nature Switzerland: Cham, Switzerland, 2024; pp. 157–178. ISBN 978-3-031-51829-4. https://doi.org/10.1007/978-3-031-51829-4_6.

- Gómez-Gil, M.; Arbulu, M.; Rueda-Esteban, M.; Monzón-Chavarriás, M.; Beltrán-Velamazán, C.; González-González, F.J. Indicators and Data in Spain Regarding an Overview of the Capacities in the Construction, Energy Efficiency and Renewable Energy Sector. En *Assessing Progress in Decarbonizing Spain's Building Stock: Indicators and Data Availability*; López-Mesa, B., Oregi, X., Eds.; Springer Nature Switzerland: Cham, Switzerland, 2024; pp. 179–200. ISBN 978-3-031-51829-4. https://doi.org/10.1007/978-3-031-51829-4_7.
- Gómez-Gil, M.; Arbulu, M.; Oregi, X.; Monzón-Chavarriás, M.; Beltrán-Velamazán, C.; González-González, F.J. Indicators and Data in Spain for an Overview of Actual Energy Savings and Wider Benefits of Renovation of Buildings. En *Assessing Progress in Decarbonizing Spain's Building Stock: Indicators and Data Availability*; López-Mesa, B., Oregi, X., Eds.; Springer Nature Switzerland: Cham, Switzerland, 2024; pp. 201–243. ISBN 978-3-031-51829-4. https://doi.org/10.1007/978-3-031-51829-4_8.
- López-Mesa, B.; Beltrán-Velamazán, C.; Gómez-Gil, M.; Monzón-Chavarriás, M.; Espinosa-Fernández, A. New Approaches to Generate Data to Measure the Progress of Decarbonization of the Building Stock in Europe and Spain. En *Assessing Progress in Decarbonizing Spain's Building Stock: Indicators and Data Availability*; López-Mesa, B., Oregi, X., Eds.; Springer Nature Switzerland: Cham, Switzerland, 2024; pp. 317–346. ISBN 978-3-031-51829-4. https://doi.org/10.1007/978-3-031-51829-4_12.
- López-Mesa, B.; Beltrán-Velamazán, C. La descarbonización del sector residencial: qué es y cuáles son sus retos en España. En *Tratado de la Vivienda*; Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, Ed.; en prensa; pp. 17–55.
- Fabbri, R.; Rocchi, L.; Montuori, M.; Beltrán-Velamazán, C.; Navarrete-Gómez, I.E.; Turchetti, A.; Zanotto, C.; Cei, L. *Ex Scuola Pietro Lana a Ferrara: Inquadramento storico e lettura critico-architettonica del progetto, nel contesto de "Il Quartiere" di Foro Boario*; Università degli Studi di Ferrara: Ferrara, Italia, 2022. ISBN 979-12-210-1391-7.

Introducción

1. Introducción

1.1. Justificación de la investigación

El cambio climático se ha convertido en uno de los mayores desafíos globales del siglo XXI. Sus efectos son cada vez más evidentes y devastadores, afectando a todos los aspectos de la vida en la Tierra. Este fenómeno, impulsado principalmente por actividades humanas como la quema de combustibles fósiles, genera un incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), lo que provoca desde el aumento de las temperaturas globales hasta la intensificación de fenómenos meteorológicos extremos [1]. El cambio climático no solo amenaza la biodiversidad y los ecosistemas, sino que también tiene graves repercusiones económicas, sociales y de salud pública. En este contexto, la sostenibilidad surge como una aproximación clave para mitigar estos efectos y promover un desarrollo equilibrado hacia una sociedad climáticamente neutra que garantice la calidad de vida de las generaciones presentes y futuras [2].

Uno de los principales contribuyentes del cambio climático es el sector de la construcción. Los edificios, tanto residenciales como comerciales, suponen aproximadamente el 36% del consumo de energía final y el 39% de las emisiones de GEI en el mundo [3]. En Europa, los edificios representan el 40% del consumo de energía final y cerca del 36% de las emisiones totales de CO₂ [4]. En España el sector de la edificación supone el 30% del consumo energético, correspondiendo el 17,1% al sector residencial y el 12,4% al sector terciario [5]. La ineficiencia energética de muchas edificaciones, combinada con el uso de combustibles fósiles para calefacción y refrigeración, es la principal causa de esta situación. Por lo tanto, la reducción del consumo energético, la eficiencia energética de los sistemas y el uso de las energías renovables en el sector de la construcción son objetivos claves para alcanzar las metas climáticas globales y regionales.

El parque edificado europeo está formado por 131 millones de edificios, 119 de ellos de uso residencial [6], y está compuesto por 259 millones de bienes inmuebles (viviendas, oficinas, etc.), de los cuales se estima que 220 millones, el 85%, fueron construidos antes del 2001 y seguirán en pie para 2050 [7]. De los edificios existentes, un 75% son energéticamente muy ineficientes, lo que conlleva que grandes cantidades de energía sean malgastadas [4], y el 97% de los edificios existentes requieren mejoras energéticas [8]. Paliar este elevado gasto de energía requiere de una intervención decidida en el parque edificado centrada en su rehabilitación energética. La inmensa mayoría de estos edificios comparten las mismas debilidades: son antiguos, ineficientes en términos energéticos y no están preparados para los cambios climáticos y las dificultades que conllevará. Es una prioridad europea intervenir en ellos y una oportunidad para mejorar la vida de

34 millones de ciudadanos europeos en situación de pobreza energética que no se pueden permitir mantener su vivienda en condiciones de confort [7].

Para poder alcanzar los objetivos de neutralidad climática de 2050 es necesario realizar políticas y planes de rehabilitación que pongan el foco en estos edificios ineficientes, y que fomenten las acciones más efectivas de cara a mejorar su comportamiento energético. El seguimiento y la monitorización continua de estas estrategias es esencial para evaluar su impacto, identificar áreas de mejora y garantizar su alineamiento con los compromisos climáticos [9]. Sin embargo, obtener datos valiosos que permitan evaluar la eficacia de los planes ya implementados y diseñar nuevas políticas y estrategias basadas en evidencias es actualmente una ardua tarea debido a la falta de datos y de metodologías que permitan utilizarlos [10]. Desarrollar metodologías que permitan la recopilación, el análisis y la utilización de datos sobre la información física, energética y geoespacial del parque edificado posee un gran potencial para apoyar la rehabilitación de los edificios [11].

1.1.1. Justificación científica de la investigación

La transición hacia un parque descarbonizado de edificios se ha consolidado como un objetivo estratégico en las políticas climáticas globales y para ello es necesario el diseño de estrategias basadas en datos [12]. Sin embargo, alcanzar esta meta requiere un fundamento esencial: la capacidad de recopilar y analizar datos relevantes que permitan diseñar e implementar políticas efectivas. Esta tarea no solo implica comprender qué avances se están logrando, sino también evaluar los beneficios obtenidos y las barreras afrontadas, proporcionando una base sólida para una toma de decisiones fundamentada en evidencias.

Tanto las instituciones que dirigen la Unión Europea (UE) como los gobiernos de los Estados Miembros (EM) que la forman son conscientes del potencial que ofrecen las innovaciones basadas en el empleo de los datos y de las nuevas tecnologías [13], apreciándose un gran potencial en su uso para fomentar políticas medioambientales. La denominada Estrategia de la UE sobre la biodiversidad de aquí a 2030 [14] incluye en su texto la importancia de la investigación para apoyar sus objetivos y el paso a ‘soluciones verdes’ en lugar de ‘soluciones grises’. El ‘Nuevo Plan de Acción para la economía circular’ [15] también destaca esta relevancia de los datos y enfatiza la importancia de la monitorización y el seguimiento de estos esfuerzos a través de indicadores, así como el papel del sector de la construcción en la economía circular [16]. En respuesta al potencial del uso en abierto de los datos, es decir, su libre y gratuita disponibilidad para ser utilizados y compartidos por cualquier persona [17], la UE ha impulsado un fuerte crecimiento de las políticas públicas para fomentarlos tanto a escala europea como nacional.

La estrategia para fomentar el uso en abierto de la información y la creación de un espacio común de datos de la UE (*EU Common Data Space*) [18] es una de las prioridades políticas de la UE. Ejemplos de ello son normativas como la Directiva PSI (*Public Sector Information*) [19], la Directiva INSPIRE (*Infrastructure for Spatial Information in Europe*) [20] y el Reglamento de Datos 2023/2854 (*Data Act*) [21], e iniciativas como el *European Interoperability Framework* (EIF) [22]. Esta estrategia y sus directivas se desarrollarán en detalle posteriormente.

En el ámbito científico, existe un campo con un enorme potencial para el cálculo de indicadores de progreso mediante el aprovechamiento de los datos abiertos: los Modelos Urbanos de Energía en Edificios (*Urban Building Energy Models*, UBEM). Estos modelos permiten analizar el comportamiento energético de los edificios a escala urbana, integrando información de múltiples edificaciones para simular y comprender el desempeño energético del área de estudio. Esta tecnología es de reciente aparición. El primer artículo publicado en el campo fue el de Reinhart et al. [23] de 2016. Desde entonces ha tenido una importante acogida como lo demuestran los numerosos trabajos publicados al respecto. Los UBEM se realizan a escala urbana generalmente [24], sin embargo, existe un reto a la hora de generarlos a escala nacional o incluso europea, normalmente debido a las altas necesidades computacionales para crear los modelos y a la falta de información para poder generarlos [25].

En los últimos años, se han desarrollado nuevas tecnologías que podrían contribuir de manera decisiva a mejorar la calidad y la cantidad de información disponible. Herramientas como los Sistemas de Información Geográfica (GIS, por sus siglas en inglés), la automatización de procesos a través de la programación, el análisis de datos a gran escala (Big Data) y el uso de Inteligencia Artificial (IA) ofrecen oportunidades sin precedentes para conocer el estado del parque edificado, analizar el rendimiento energético de los edificios y su impacto en el medio ambiente.

El campo de las nuevas tecnologías y los avances en descarbonización, rehabilitación y sostenibilidad en el sector de la edificación se encuentra en un fuerte auge. Awuzie et al. [26] en su revisión bibliográfica encuentran un total de 314 artículos y 147 ponencias en congresos sobre la temática de IA junto con la descarbonización y la economía circular, siendo el 81% de estas investigaciones publicadas entre 2021 y 2024. El buscador de documentos científicos de Scopus [27] permite realizar un análisis del número y de la fecha de las publicaciones científicas por términos específicos en títulos, resúmenes y palabras clave. A fecha de septiembre de 2024, en base a los datos disponibles en Scopus que combinen los términos de descarbonización y edificios o rehabilitación se encuentran 2.498 publicaciones. Que además incorporen alguna de las nuevas tecnologías mencionadas hay 390 documentos científicos, como puede verse en la figura 1 la mayor parte de ellos realizados en los últimos 3 años.

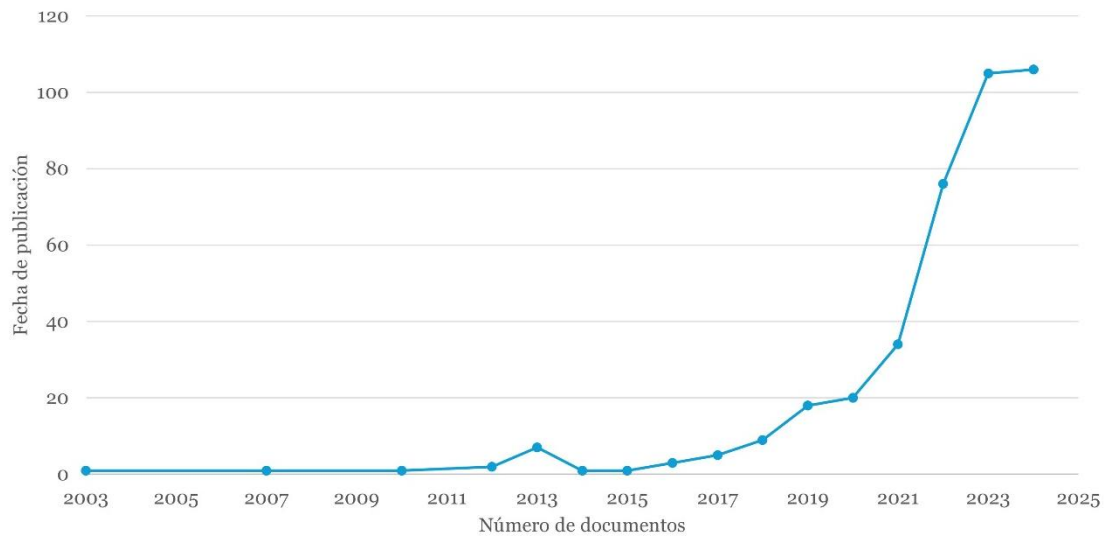


Figura 1. Número de publicaciones científicas por año que incluyen los términos descarbonización y edificios o rehabilitación. Elaboración propia a partir de Scopus [27].

En estas publicaciones que exploran el uso de nuevas tecnologías aplicadas a la descarbonización, se encuentran 94 que corresponden al uso de IA, 17 al uso de GIS, 75 al uso de Big Data y 204 al uso de programación y desarrollo de código. Forman todavía una parte reducida del total de publicaciones científicas, pero con un fuerte auge en los últimos años, acompañado por el rápido desarrollo de estas tecnologías que en los últimos años han tenido grandes mejoras en cuanto a rendimiento y capacidad de manejar los datos.

El campo de los UBEM ha tenido igualmente un fuerte auge. Como se desarrollará posteriormente, existen un total de 405 publicaciones científicas indexadas en Scopus, un 85% en los últimos 5 años. En cuanto al uso de estas nuevas tecnologías en el campo de los UBEM se encuentran 54 correspondientes al uso de IA, 55 al uso de GIS, 8 al uso de Big Data y 40 al uso de programación y código. Destaca el rápido avance de la IA en los últimos dos años donde se concentran casi todas las publicaciones. El uso de GIS está implícito en los modelos UBEM por lo que no se emplea tanto como cabría esperar, ya que es una tecnología fundamental en estos modelos. El Big Data es todavía un punto pendiente en las publicaciones científicas, ya que el uso de grandes cantidades de datos y además geoespaciales genera una alta complejidad en la creación de los modelos y una elevada demanda de recursos computacionales [28]. La programación surge como una herramienta que, aunque no es obligatoria gracias al abanico de herramientas existentes, tiene un alto impacto en este campo debido a las muchas posibilidades que ofrece de cara a la creación y al uso de estos modelos [29].

El uso de modelos UBEM y el aprovechamiento de las potencialidades que ofrecen estas nuevas tecnologías no solo permiten estimar con mayor precisión el consumo energético y las emisiones de GEI asociadas, sino también predecir

cómo podrían evolucionar bajo diferentes escenarios de intervención [11], como se explicará posteriormente.

A pesar de su potencial, el uso de estas tecnologías aún no ha sido adoptado de manera generalizada en las estrategias políticas y administrativas [30], debido a una serie de barreras: la falta de datos y de instituciones que los provean [31], la falta de interoperabilidad entre las fuentes de datos [32], la complejidad de un uso apropiado de los datos [33] y los requisitos computacionales que implica [34]. Además, la recopilación y análisis sistemático de datos y su publicación en abierto no es únicamente un requisito técnico, sino también un compromiso con la transparencia en las políticas de descarbonización. Al proporcionar información detallada y actualizada, se fortalece la capacidad de los gobiernos para comunicar los beneficios de las acciones implementadas y para fomentar la participación de la sociedad en la transición energética [35].

En conclusión, la integración de nuevas tecnologías en el diseño y seguimiento de políticas públicas representa un desafío importante, pero también una oportunidad para transformar la manera en que se aborda la descarbonización del parque edificado. Medir la descarbonización requiere un enfoque integral que combine la recopilación de datos precisos, la medición constante de avances y el uso de las nuevas tecnologías que permitan aprovechar mejor estos datos. La generación de políticas basadas en datos no solo garantizará una mayor eficacia en la acción climática, sino que también permitirá construir un modelo de desarrollo más inclusivo, transparente y ambientalmente responsable.

1.1.2. Estado de la cuestión

Europa ha sido pionera en la lucha contra el cambio climático y la promoción de la sostenibilidad. En diciembre de 2019, la Comisión Europea lanzó el Pacto Verde Europeo (*European Green Deal*) [36], una estrategia ambiciosa que tiene como objetivo transformar la economía de la Unión Europea en una economía moderna, eficiente en el uso de los recursos y competitiva, asegurando al mismo tiempo que no haya emisiones netas de GEI en 2050. Este pacto es la piedra angular de la política climática europea e incluye una hoja de ruta con acciones claves en diversas áreas, como la energía, el transporte, la agricultura y la construcción, para reducir las emisiones, impulsar la innovación y proteger el medio ambiente. Además, el Pacto Verde Europeo se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) [37], reafirmando el compromiso de Europa con el desarrollo sostenible y la acción climática.

Como parte del Pacto Verde Europeo, el paquete 'Fit for 55' [38] es una propuesta legislativa presentada por la Comisión Europea en julio de 2021. Su

nombre hace referencia al objetivo de reducir las emisiones de GEI de la UE en al menos un 55% para 2030, en comparación con los niveles de 1990. Este objetivo intermedio es crucial para poner a la UE en el camino hacia la neutralidad climática para 2050, siendo especialmente ambicioso en materia de eficiencia¹ energética, energías renovables y estándares de construcción más estrictos para 2030, lo que se traduce en un impulso importante para acelerar la rehabilitación de edificios en toda Europa.

En materia de edificación, la Directiva de Eficiencia Energética de los Edificios (*Energy Performance of Buildings Directive*), conocida por sus siglas en inglés como EPBD, es la principal impulsora de la eficiencia energética en la edificación en Europa. Esta directiva es reforzada y complementada por otra con un carácter más general, la Directiva de Eficiencia Energética (*Energy Efficiency Directive*), conocida por sus siglas en inglés como EED. Estas dos directivas son las que, en líneas generales, impulsan los avances en eficiencia energética y descarbonización de la edificación en Europa. Aparecen por primera vez en 2002 y 2012 respectivamente y han sido modificadas progresivamente, quedando actualmente integradas dentro del marco legislativo que abarca el ‘Fit for 55’.

En este sentido, el paquete de medidas ‘Fit for 55’, desarrollado en el marco del Pacto Verde Europeo, incluye enmiendas significativas a estas directivas con el objetivo de acelerar la transición hacia un parque edificado descarbonizado y energéticamente eficiente. A través de la EPBD se establece un conjunto de medidas para descarbonizar el parque edificado y mejorar la eficiencia energética de los edificios existentes en los EM de la Unión Europea, y se fomenta el uso de tecnologías, materiales sostenibles y prácticas de construcción ecológicas, con el objetivo de convertir a los edificios en elementos claves para alcanzar la neutralidad climática en 2050. Además, la directiva se centra en la integración de fuentes de energía renovable en los edificios y la mejora del confort y la calidad del aire interior, beneficiando tanto a los ciudadanos como al medio ambiente.

Mientras que el Pacto Verde Europeo y el ‘Fit for 55’ establecen los marcos legislativos y los objetivos claros de reducción de emisiones para 2030 y 2050, la EPBD y la EED proporcionan los medios prácticos y regulatorios para que el sector de la construcción, uno de los más intensivos en energía, cumpla con estos objetivos.

¹ En español, el término ‘eficiencia’ se utiliza con un alcance semántico más amplio que en otros idiomas, llegando, en determinados casos, a abarcar significados que en otras lenguas se expresan mediante el término ‘eficacia’. En particular, la expresión ‘eficiencia energética’ integra también el concepto de eficacia, dado que el término ‘eficacia energética’ no se emplea de manera habitual en la literatura científica ni técnica en español. Por consiguiente, en esta tesis se adoptará el uso de la expresión eficiencia energética para englobar ambos conceptos.

Estas directivas y las estrategias europeas que les han dado forma son de gran relevancia para comprender los objetivos perseguidos por la investigación desarrollada en la tesis. En la figura 2 se muestra la evolución de las estrategias y de las directivas relativas a la eficiencia energética en la edificación que se van a detallar en esta sección. La figura 2 abarca los acuerdos de la ONU, las estrategias europeas de ámbito superior al del sector de la edificación y las directivas concretas aplicables a este sector.

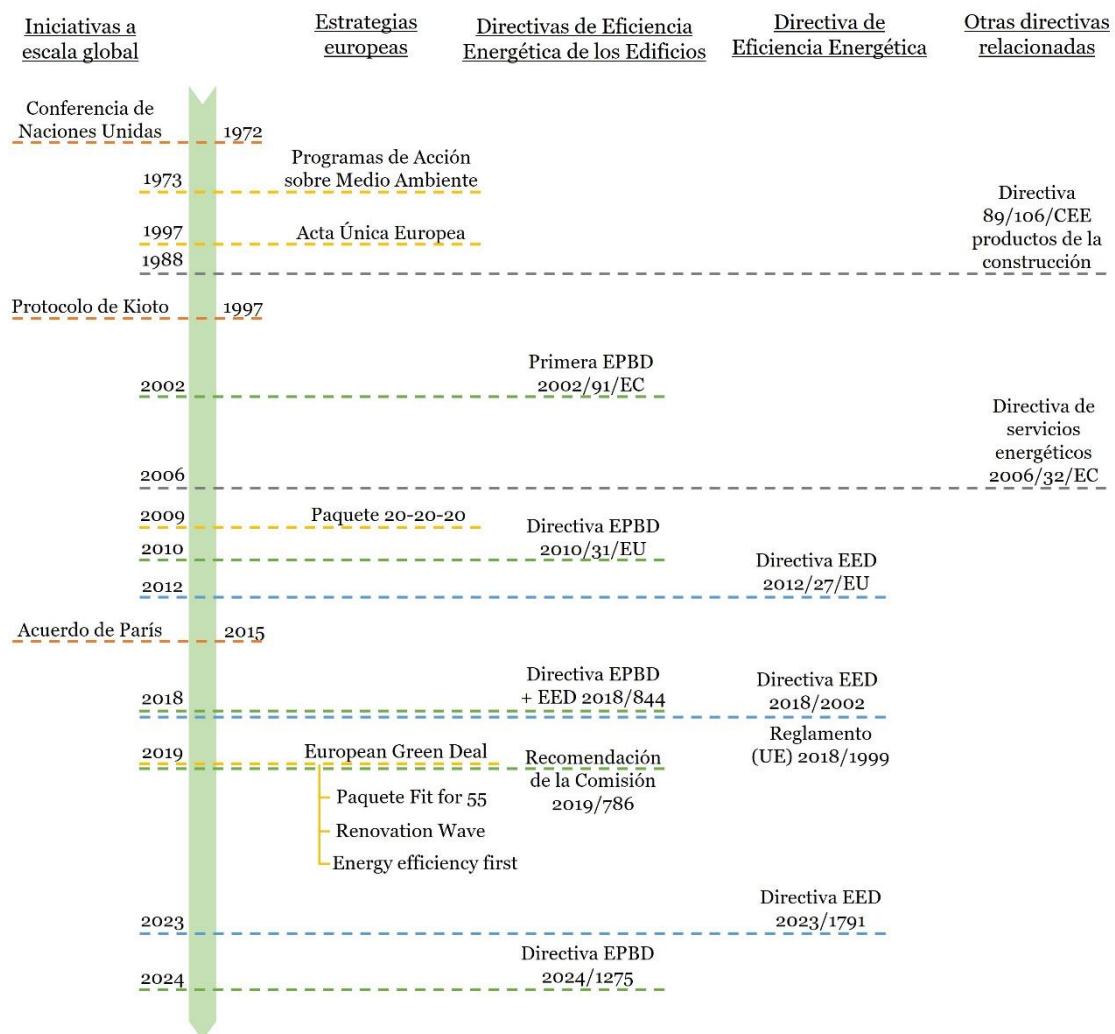


Figura 2. Evolución de las estrategias y directivas relacionadas con la eficiencia energética en la edificación. EPBD: Directiva de Eficiencia Energética de los Edificios (Energy Performance of Buildings Directive), EED: Directiva de Eficiencia Energética (Energy Efficiency Directive), EC: Comisión Europea. Elaboración propia.

Como punto de partida, a escala internacional, la Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano de Estocolmo de 1972 fue la primera conferencia internacional sobre cuestiones medioambientales, culminando en la Declaración y el Plan de acción de Estocolmo para el medio humano [39] y la

creación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).

En 1973, en Europa, coincidieron dos factores decisivos. Por un lado, la crisis del petróleo, la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) decidió no suministrar más petróleo a los países que apoyaban a Israel en la guerra de Yom Kipur, generando una grave crisis energética en los países europeos. Esta crisis puso de manifiesto la vulnerabilidad energética de Europa y fomentó la adopción de políticas de seguridad energética, reducción de la dependencia de combustibles fósiles importados y los avances en eficiencia energética, no enfocados a la reducción de emisiones sino a reducir la dependencia de las importaciones de productos petrolíferos [40]. Por el otro lado, en 1973 se firmó el primer Programa de Acción sobre Medio Ambiente (*Environment Action Programme*) [41], el cual se enfoca en aspectos como limitar las emisiones de los vehículos y el contenido de plomo en la gasolina y plantea las directrices que seguirá Europa en materia medioambiental [42] [43]. En 1987 con la firma del Acta Única Europea [44], se incluye la protección del medio ambiente como competencia de las Comunidades Europeas, la base de la posterior Unión Europea.

Anterior a las primeras directivas en materia de eficiencia energética en la edificación, se encuentran avances como la Directiva 89/106/CEE [45], la cual incluye como requisito esencial el ahorro de energía y el aislamiento térmico. Sin embargo, únicamente dedica una frase sobre la necesidad de moderar el consumo de energía en base a los requisitos del clima y la población.

El 16 de diciembre de 2002 se aprueba la primera directiva que trata la eficiencia energética en la edificación de forma específica, la Directiva 2002/91/CE [46], la EPBD. Entre otras cuestiones, estableció una metodología de cálculo de la eficiencia energética de los edificios de los países miembros e implementó el uso de los Certificados de Eficiencia Energética (CEE, conocido como EPC por su nombre en inglés *Energy Performance Certificate*). Esta directiva y sus posteriores enmiendas serán las que impulsen los avances en eficiencia energética y descarbonización de la edificación en Europa.

La Directiva 2006/32/CE [47] sobre la eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos, también conocida como la Directiva de Servicios Energéticos, fue adoptada el 5 de abril de 2006 y tenía como objetivo principal establecer un marco para garantizar la mejora de la eficiencia energética en el uso final de la energía dentro de la UE. Esta directiva fue la base de la posterior EED y tenía un enfoque amplio, abarcando todas las áreas de consumo de energía, con el fin de reducir el consumo de energía primaria y contribuir a los objetivos de la UE en materia de reducción de emisiones de CO₂ y sostenibilidad. Estableció un objetivo indicativo para los EM de lograr una reducción del 9% en el consumo de energía final en un período de nueve años (2008-2017) a través de la

implementación de medidas de eficiencia energética e introduce por primera vez los Planes Nacionales de Acción de Eficiencia Energética (*National Energy Efficiency Action Plans*) que describen cómo alcanzarían los objetivos de ahorro de energía, incluyendo medidas específicas y políticas nacionales.

Con el objetivo de impulsar la transición hacia una Europa descarbonizada, se lanzó en 2009 el denominado paquete 20-20-20, un paquete de medidas a aplicar basado en tres áreas principales: la reducción en 20% de las emisiones de gases de efecto invernadero, el aumento de la eficiencia energética con ahorros de un 20% de la tendencia esperada y el fomento de las energías renovables hasta alcanzar un 20% del total, las tres con una fecha marcada para 2020. Este paquete se concretó en directivas en varios campos, destacando en el sector de la construcción las posteriores enmiendas a las directivas EPBD y EED.

La EPBD fue revisada (Directiva 2010/31/UE) [48] en 2010 para abordar cambios en la directiva original y alinearse mejor con los objetivos climáticos de la UE. Esta versión revisada introdujo el concepto de edificios de consumo de energía casi nulo (EECN, nZEBs por su nombre en inglés *Nearly Zero Energy Buildings*) y amplió los requisitos de eficiencia energética, destacando la importancia del sector de la edificación en los planes nacionales indicados en la Directiva 2006/32/CE.

En 2012, la Directive 2012/27/EU [49], la EED, en su artículo 4, Renovación de edificios², ya establece que los EM de la UE deben elaborar una estrategia nacional a largo plazo para movilizar la inversión en rehabilitación del parque construido nacional (denominada en inglés *National Long-Term Strategy for Mobilising Investment in the Renovation of the National Stock*) para 2014. En el artículo 5 sobre la 'Función ejemplarizante de los edificios de los organismos públicos' establece la importancia de la descarbonización de los edificios públicos para impulsar la descarbonización del parque edificado. En España esta estrategia se denominará Estrategia a largo plazo para la Rehabilitación Energética en el Sector de la Edificación en España (ERESEE) [50].

Durante el año 2018, la EED se vio modificada por importantes reformas legislativas. La Directiva (UE) 2018/2002 [51] establece objetivos más ambiciosos en materia de eficiencia energética de cara a 2030, con obligaciones más estrictas y mediciones basadas en ahorros reales y medibles, para que los EM alcancen mayores ahorros energéticos acumulativos. Por otro lado, el Reglamento (UE)

² El término en inglés 'renovation' se traduce al español como 'rehabilitación'. No obstante, en las traducciones oficiales de la legislación europea, se utiliza la palabra 'renovación'. En esta investigación, se optará por emplear el término 'rehabilitación', reservando el uso de 'renovación' exclusivamente para referirse al término específico tal y como se menciona en la normativa europea en español.

2018/1999 [52], realiza una aportación muy relevante de cara a las políticas medioambientales, incluyéndolas a través de los Planes nacionales integrados de energía y clima (PNIEC), profundizando en la medición de los resultados y los hitos que deben irse alcanzando. Estos planes nacionales abarcan una década, con el primer plan presentado en 2020.

Además, en 2018 se da un paso clave para conocer los avances de la descarbonización y la rehabilitación mediante la Directiva (EU) 2018/844 [53]. Esta actualiza tanto la EED como la EPBD, con la finalidad de acelerar la rehabilitación de los edificios existentes, mejorar su eficiencia energética, integrar tecnologías inteligentes, facilitar la descarbonización del parque inmobiliario europeo e impulsar el conocimiento que se tiene del parque edificado y sus necesidades. La directiva define que cada país debe desarrollar su propia Estrategia de Renovación a Largo Plazo (LTRS³, por sus siglas en inglés *Long-Term Renovation Strategies*), modificando las anteriores estrategias que debían presentar los EM. En las nuevas estrategias se profundiza en conocer las características del parque construido, cómo se está rehabilitando y qué beneficios se obtienen y a qué barreras se están enfrentando. Esta enmienda de las directivas hace especial énfasis en la importancia de medir y conocer el parque edificado, con datos reales y amplios sobre el estado de los edificios en el país y las acciones que se están llevando a cabo, así como sus beneficios y barreras afrontadas. Es por ello por lo que se crean los indicadores de progreso (*progress indicators*) en las LTRS para poder monitorizar el avance hacia la descarbonización y la obtención de edificios con una alta eficiencia energética.

En respuesta a las dudas que los EM formularon acerca de qué indicadores de progreso desarrollar, en 2019 la Comisión Europea publicó la Recomendación de la Comisión (*Commission Recommendation*) (EU) 2019/786 [54], donde propuso un conjunto de 71 indicadores de progreso basados en 12 áreas temáticas. De forma que los países miembros tengan un conjunto de indicadores sobre el que basarse para seleccionar los más adecuados para medir la descarbonización.

Al terminar el año 2020 se cumplió el plazo para alcanzar los objetivos del paquete 20-20-20. Como se indica en el informe [55] de la *European Environment Agency* (EEA) de 2021, 21 de los 27 de EM de la UE han alcanzado los objetivos y en conjunto para 2020 se superaron los objetivos marcados para la UE. Es destacable que se alcanzaron los objetivos incluso sin contar con el efecto que tuvo la pandemia de COVID-19, con una reducción de las emisiones de GEI para

³ Las siglas en español son ERPL, sin embargo, se opta por usar las siglas en inglés debido a que el uso de las siglas en español tiene un uso muy marginal, empleándose en la literatura de forma común LTRS o las siglas de ERESEE, correspondientes a la Estrategia a largo plazo para la Rehabilitación Energética en el Sector de la Edificación en España [5].

2019 de un 24% respecto a 1990, habiendo superado el objetivo del 20%. Sin embargo, también se indica la necesidad de impulsar más políticas y esfuerzos para poder alcanzar con éxito los objetivos en 2030, ya que la previsión en base a la tendencia estudiada no los conseguía lograr para dicho año.

De este esfuerzo por impulsar la transición hacia un continente climáticamente neutro y en respuesta al compromiso adquirido en el Acuerdo de París de 2015, el 11 de diciembre de 2019 se presenta el Pacto Verde Europeo (*European Green Deal*), estableciendo unos objetivos más ambiciosos e impulsando la transición de todos los sectores económicos hacia la descarbonización. Su primera medida fue la adopción del Reglamento (UE) 2021/1119 [56], conocido como la Ley Europea del Clima (*European Climate Law*), estableciendo el objetivo de neutralidad climática para 2050 y los objetivos intermedios de reducción de las emisiones netas de GEI en un 55%, y la evaluación de las medidas adoptadas y los avances.

Dentro de las múltiples iniciativas que forman el Pacto Verde Europeo en relación con la edificación destacan las siguientes:

- El principio de ‘primero, la eficiencia energética’ (*Energy Efficiency First principle*) establece que la eficiencia energética debe priorizarse en todas las decisiones de política energética y de inversión. Este es un principio legislativo transversal que actúa como principio rector en todas las políticas que diseñe la UE [57], y es clave en la EPBD y en la EED.
- La Oleada de Renovación (*Renovation Wave*) [58], lanzada en 2020 como parte del Pacto Verde Europeo, es una estrategia diseñada para incrementar la tasa de rehabilitación de edificios en la UE y fomentar las rehabilitaciones profundas.
- El paquete ‘Fit for 55’ [38], presentado en 2021, es un conjunto de medidas legislativas diseñado para impulsar la descarbonización para que la UE cumpla su meta de reducir las emisiones. Entre estas medidas se encuentra la revisión de la EPBD y la EED.

Apoyando a su vez al Pacto Verde Europeo, en 2021 se presentó el NextGenerationEU, un instrumento temporal destinado a impulsar la recuperación económica tras la pandemia del COVID-19, promover la cohesión social y territorial, y fomentar la transición ecológica y digital. Al compartir objetivos con el Pacto Verde Europeo, transformar sectores clave (energía, transporte, industria y construcción) hacia modelos más sostenibles y competitivos, el NextGenerationEU ha servido de motor financiero para impulsar muchas de las medidas que contempla el pacto, como la rehabilitación energética de edificios o la inversión en infraestructuras para energías renovables.

Con este impulso hacia objetivos más ambiciosos en el sector de la edificación, y con un énfasis especial en la necesidad de rehabilitar los edificios

se realiza una nueva revisión de las directivas EPBD y EED, materializando estos impulsos en medidas y planes concretos en materia de edificación.

En cuanto a la EED, en 2023 se enmienda con la Directiva (UE) 2023/1791 [59], estableciendo el objetivo de una reducción del consumo de energía de un 11,7% respecto a los niveles de 2020. Y pone el foco en la mejora de la eficiencia del sector público, la protección a los consumidores vulnerables y la reducción en el uso de combustibles fósiles.

A su vez, entre los años 2021 y 2023 la Comisión Europea propondrá tres borradores diferentes [60], [61] y [62] para la nueva enmienda de la EPBD. Conforme avanza el proceso de consulta y negociación entre los EM y las diferentes instituciones que forman la UE, variarán los objetivos, proponiéndose diferentes escenarios en base sobre todo a los Requisitos mínimos de eficiencia energética (*Minimum energy performance standards*) para intervenir en el parque edificado. Estos requisitos están fundamentados en los Certificados de Eficiencia Energética (CEE) y sus clasificaciones energéticas, los cuales toman un gran protagonismo en estas nuevas enmiendas de la EPBD.

Dentro de las modificaciones de las diferentes propuestas, un apartado que varía fuertemente es el relativo a qué y cómo se debe medir el avance de la descarbonización, es decir, los indicadores de progreso. Estos se replantean y reformulan en las sucesivas propuestas para el nuevo texto de la EPBD entre 2020 y 2023 [62]. La propuesta original de 71 indicadores de progreso de la Recomendación de la Comisión de 2019 cambiará completamente hasta llegar a la Directiva (UE) 2024/1275, el texto refundido de la EPBD de 2024 [63], donde se proponen 135 indicadores, 89 obligatorios y 46 opcionales, repartidos en 7 áreas temáticas. Esta directiva establece por primera vez la obligación a los EM de aportar ciertos indicadores obligatorios de progreso para informar de los avances en la descarbonización del parque edificado. Este cambio resulta particularmente interesante, ya que el poseer un marco común de indicadores de progreso en todos los países permite un análisis supranacional de los avances y las estrategias implementadas en los diferentes EM, permitiendo extender la capacidad de estudio al entorno europeo.

Un cambio relevante que plantea el texto refundido de la EPBD de 2024 se recoge en el Artículo 3, el cual cambia las mencionadas LTRS, por los Planes Nacionales de Renovación de Edificios (PNRE, *National Building Renovation Plans*, NBRP). Estos nuevos planes nacionales serán mucho más completos que las anteriores LTRS en cuanto a la información aportada. El nivel de definición del parque edificado, de los resultados obtenidos por las políticas y de la hoja de ruta para rehabilitar los edificios es mucho mayor.

Este avance, orientado hacia la toma de decisiones basadas en datos y hacia un mayor conocimiento del parque construido y de la monitorización de las políticas desarrolladas, implica un reto para los EM que deben desarrollar nuevas

estrategias y herramientas para poder obtener la información necesaria para alcanzar las exigencias de la nueva normativa.

En consecuencia, estos avances hacia la recogida de información han hecho surgir dudas por parte de los EM acerca de cómo recoger la información solicitada, debido a la falta de herramientas, metodología e instituciones enfocadas a la recopilación y publicación de la información requerida, tal y como se indica en las LTRS de 2020 de Francia [64], Lituania [65] y Bulgaria [66]. De forma que, aunque los EM deben aportar de forma obligatoria 89 indicadores no existe una metodología clara ni un criterio de cálculo homogéneo.

En el contexto nacional español, la última actualización de la ERESEE en este momento es de 2020 [5] y se encuadra dentro del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030 [67] del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y en la actualización de 2024 [68]. Esta LTRS fue la mejor valorada de entre todas las analizadas por el Buildings Performance Institute Europe (BPIE) en su estudio [31]. Destaca la calidad de la estrategia española, la cual incorpora una serie de propuestas de indicadores de progreso, en parte coincidentes con los de la Recomendación de la Comisión Europea de 2019. Sin embargo, como se comenta en [69] los indicadores de progreso planteados son escasos y todavía se encuentran en una fase muy temprana de desarrollo.

1.2. Hipótesis de trabajo

La hipótesis de trabajo desde la que parte esta tesis es que, ante la actual necesidad de obtener los mencionados indicadores de progreso y la dificultad de lograr datos para poder calcularlos, el uso de las nuevas tecnologías, como el GIS, el Big Data, la automatización de procesos y la IA, va a permitir generar información útil sobre nuestros edificios para conseguir ciertos indicadores de progreso. Además, el uso de datos en abierto tiene la ventaja de generar unas herramientas automáticas y aplicables a más casos de estudio con resultados contrastables y comparables. Este conocimiento generado facilitará el análisis del parque edificado y la toma de decisiones basadas en datos.

Se parte de la premisa de que los datos en abierto publicados hasta la fecha son suficientes para generar un abanico de indicadores de progreso, actualmente no desarrollados debido a la falta de metodologías y que el uso de las nuevas tecnologías puede ser la clave para obtenerlos. Dentro de los datos en abierto disponibles (catastro, Certificados de Eficiencia Energética, Modelos Digitales del Terreno, etc.), hay una gran cantidad de información disponible que, combinada a través de las nuevas tecnologías, permitiría generar un Modelo Urbano de Energía en Edificios (*Urban Building Energy Model*, UBEM) a escala nacional. Este modelo UBEM tiene el potencial de dar respuesta a una parte de los indicadores

de progreso requeridos a los EM e incluso desglosarlos con mayor nivel de detalle para servir de apoyo a la generación de políticas basadas en datos.

Objetivos y metodología

2. Objetivos y metodología

2.1. Objetivos generales y preguntas de investigación

El objetivo principal de esta tesis es definir la metodología para construir un modelo que amplíe y mejore la información y el diagnóstico energético que se tiene del parque edificado español. Esta información se podrá usar para obtener varios de los indicadores de progreso requeridos por la Comisión Europea y dar apoyo a la generación de políticas basadas en datos. El objetivo fundamental de esta investigación no es calcular los indicadores, sino definir una metodología que utilice nuevas tecnologías para automatizar la obtención de datos para el desarrollo de dichos indicadores. La tesis no busca desarrollar el modelo en sí, sino identificar el conjunto de herramientas que lo generan y facilitar la creación, análisis y actualización de estos modelos automáticamente. De esta forma el resultado de la tesis no es un modelo único, sino la definición de una metodología que facilita la generación, análisis y actualización automática de los modelos.

Objetivos generales:

1. Identificar los indicadores de progreso relativos a las características generales y energéticas de la edificación y analizar la calidad de los datos existentes para su cálculo en España.
2. Estudiar las oportunidades que ofrecen los datos en abierto, el Big Data y los modelos UBEM para mejorar la calidad de los datos en el desarrollo de los indicadores de progreso.
3. Crear una metodología para generar un modelo GIS, edificio a edificio, con la información física y geoespacial de todos los edificios de España y con la información energética de los edificios con un CEE registrado en abierto.
4. Diseñar una metodología para la creación de una herramienta que permita generar UBEM a escala nacional, que aproveche el potencial actual de la IA y permita predecir el comportamiento energético de los edificios que no disponen de un CEE registrado en abierto.

A partir de estos objetivos, esta tesis doctoral se plantea una serie de preguntas de investigación sobre las que se desarrollará la misma.

El primer bloque de preguntas se vincula con el objetivo general 1:

- ¿Cuál es el nivel de conocimiento actual que se tiene sobre los edificios?
- ¿Es suficiente para dar respuesta a los indicadores de progreso que pide la Comisión Europea para el seguimiento de la descarbonización?
- ¿Los datos existentes tienen suficiente calidad?

El segundo bloque de preguntas hace referencia al objetivo general 2. Una vez que se observa que no existen suficientes datos de calidad, se plantean las siguientes preguntas:

- ¿Cómo conocer más sobre el estado energético del parque edificado?
- ¿Qué nuevas herramientas pueden hacer posible avanzar en el conocimiento sobre el parque construido?
- ¿Cómo construir un modelo a escala nacional y qué dificultades supone realizarlo?

El tercer bloque de preguntas surge del objetivo general 3. Una vez que se entiende que uno de los retos de los UBEM es su elevada exigencia computacional y la pérdida de precisión en grandes escalas, cabe preguntarse:

- ¿Se puede construir un UBEM a partir de CEE?
- ¿Es la calidad de los resultados de este UBEM adecuada?

El cuarto bloque de preguntas es consecuencia del objetivo general 4. Dado que en el modelo basado en CEE solo alrededor del 10% de los edificios dispone de un CEE, las preguntas a formular son:

- ¿Puede la IA predecir el comportamiento energético de los edificios de los que no se tienen datos?
- ¿Es la calidad de los resultados de este UBEM híbrido adecuada?
- ¿Sirven estos datos para el desarrollo de indicadores de progreso?

Esta tesis doctoral tiene como propósito responder a estas preguntas, o al menos contribuir al conocimiento necesario para darles respuesta. Con el fin último de aportar metodologías, herramientas y enfoques que permitan no solo un diagnóstico más riguroso del parque edificado, sino también facilitar su transformación hacia un modelo más sostenible y eficiente desde el punto de vista energético y ambiental.

A partir de estas preguntas se han ido desarrollando objetivos específicos que permiten darles respuesta y alcanzar los objetivos generales planteados.

2.2. Metodología de investigación

La metodología empleada está estrechamente vinculada a los objetivos generales de la tesis, describiendo el proceso de investigación realizado.

1. Revisión bibliográfica de la literatura existente, tanto la legislación y fuentes de información que pueden aportar datos para desarrollar los

indicadores, como la literatura científica sobre las tecnologías e innovaciones científicas que pueden contribuir a la obtención y mejora de los datos.

2. Propuesta metodológica. Una vez que se ha obtenido una visión global de la problemática y las oportunidades, se desarrolla una metodología inductiva sobre cómo abordar la generación de estos indicadores a través de modelos UBEM, sistematizando el objeto de estudio y abordando las diferentes problemáticas para poder crear modelos que obtengan la información deseada.
3. Desarrollo empírico de los modelos. Partiendo de la metodología planteada se va desarrollando un modelo que permita, de forma automática, recopilar y tratar los datos para generar los modelos.
4. Refinamiento y ajuste de los modelos. En cada modelo se evalúan los resultados obtenidos, su calidad y sus aplicaciones prácticas. Sobre la base de los resultados obtenidos se genera un proceso iterativo de ajuste de los modelos para mejorar su potencial.
5. Validación del modelo.

Las herramientas empleadas han sido fundamentalmente software para programar y software para la visualización de datos geoespaciales. Tanto éstos como las fuentes empleadas han sido múltiples y se detallan en cada apartado.

La metodología empleada se ha dividido en los siguientes pasos, para ir dando respuesta a los objetivos y las preguntas de la investigación:

- Identificación de los indicadores de progreso.
- Identificación de las fuentes de datos.
- Disponibilidad de datos en España para el desarrollo de indicadores de progreso.
- Desarrollo de una metodología para analizar la calidad de los indicadores de progreso.
- Estudio de la calidad de los datos para el desarrollo de indicadores.
- Estudio de las iniciativas y estrategias europeas sobre datos en abierto.
- Estudio de las fuentes de información en abierto en España para desarrollar el modelo UBEM.
- Retos de los UBEM.
- Nuevos avances en tecnologías y su potencial para generar UBEM.
- Análisis de las fuentes de información a emplear en el modelo UBEM y sus características.
- Definición de una metodología y los criterios para generar un UBEM a escala nacional.
- Automatización de los procesos de descarga, tratamiento de los datos y análisis.
- Validación del modelo.

- Metodología para emplear el modelo anterior para entrenar una IA.
- Generación de variables geoespaciales.
- Selección del algoritmo.
- Entrenamiento y testeo.
- Validación del modelo.

2.3. Estructura de la investigación

La tesis está dividida en 7 capítulos:

El capítulo 1 comprende la introducción a la problemática, y la definición de la hipótesis de trabajo.

El capítulo 2 aborda los objetivos, la metodología empleada y la estructura de la tesis.

El capítulo 3 corresponde al estudio de los indicadores de progreso, su calidad y disponibilidad, y a las oportunidades que los datos en abierto y las nuevas tecnologías ofrecen para calcularlos, correspondiendo a los objetivos generales 1 y 2.

El capítulo 4 aborda la creación de un modelo UBEM a escala nacional, basado en Certificados de Eficiencia Energética, que combine la información geográfica y física de todos los edificios con la información energética de los CEE en abierto.

El capítulo 5 desarrolla la generación de una herramienta que, a través de los datos obtenidos en el apartado anterior, sea capaz de entrenar una IA que realice una predicción de los datos de los edificios de los que no se dispone de información energética.

El capítulo 6 muestra la aplicabilidad de los modelos obtenidos en el conjunto de esta investigación, estudiando los indicadores de progreso obtenidos, la información que se puede generar sobre el parque edificado con los modelos y la información más relevante encontrada y termina con un ejemplo de aplicación a escala urbana.

El capítulo 7 desglosa las conclusiones, donde se analizan los resultados obtenidos y se verifica la hipótesis de partida y los objetivos de la investigación. Y plantea las futuras líneas de investigación que surgen de la tesis. Está escrito en español e inglés.

Por último, se añaden los anexos que complementan la información de los capítulos.

En esta tesis se desarrollan dos modelos, presentados en los Capítulos 4 y 5. Dado que el segundo modelo depende directamente de los resultados del

primero, se ha optado por dedicar un capítulo específico a cada uno. En estos capítulos se describen en detalle la metodología propuesta para construir los modelos, los datos de entrada, los procesos de validación y la aplicabilidad de los resultados obtenidos.

Los Capítulos 4 y 5 están dedicados a la definición de los modelos, a la metodología desarrollada para construirlos y a los datos generados. El Capítulo 6, por su parte, se centra en la presentación y análisis de los datos obtenibles empleando ambos modelos.

Es importante destacar que, en el marco de esta investigación, las metodologías de generación automática de los modelos constituyen un resultado fundamental en sí mismo, con una relevancia igual o incluso superior a los datos obtenidos a partir de dichos modelos.

En la tabla 1 se muestra la relación entre los capítulos siguientes, los objetivos que persiguen y los métodos empleados.

Tabla 1. Relación entre los objetivos, los métodos y la estructura de la tesis.

Estructura	Objetivo	Método
Capítulo 3	1 y 2	1
Capítulo 4	3	2, 3, 4 y 5
Capítulo 5	4	2, 3, 4 y 5
Capítulo 6	Aplicabilidad de los modelos	
Capítulo 7	Conclusiones y futuras líneas de investigación	

Base teórica y estado del arte

El capítulo 3 es una versión extendida y actualizada de las siguientes publicaciones:

- Beltrán Velamazán, C.; Gómez Gil, M.; López Mesa, B.; Monzón Chavarrias, M.; González González, F. Comparison of Frameworks for the Assessment of Decarbonisation of European National Building Stocks. *Environmental and Climate Technologies* **2023**, 27, 506-515, <https://doi.org/10.2478/rtuct-2023-0037>.
- Beltrán Velamazán, C.; Gómez Gil, M.; Monzón Chavarrias, M.; Espinosa Fernández, A.; López Mesa, B. Harnessing Open European Data for a Data-Driven Approach to Enhancing Decarbonization Measurement in the Built Environment. *Environmental and Climate Technologies* **2024**, 28, 776–793, <https://doi.org/10.2478/rtuct-2024-0060>.

Y de capítulos del libro:

- López Mesa, B.; Oregi, X., Eds. *Assessing Progress in Decarbonizing Spain's Building Stock*; Springer Nature Switzerland: Cham, Switzerland, 2024. ISBN 978-3-031-51829-4. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-51829-4>.

3. Base teórica y estado del arte

La rehabilitación de edificios es un eje principal en la política europea debido al gran impacto ambiental del parque edificado existente. Un 75% del parque construido en Europa es energéticamente ineficiente, por lo que es necesario intervenir a gran escala sobre estos edificios para lograr los objetivos de neutralidad climática de 2050 [4].

Además, el sistema de calefacción de los edificios se basa sobre todo en el gas natural, que constituye aproximadamente el 39% del consumo energético destinado a calentar espacios en el sector residencial. El petróleo, con un 11%, es el segundo combustible fósil más empleado para este propósito, mientras que el carbón representa cerca del 3% [63]. Desde la aprobación de la revisión de la EPBD de 2018 [53], se ha puesto el foco en la medición del progreso, en la descarbonización y en la rehabilitación del parque edificado. Para ello cada país debe tener en su LTRS una hoja de ruta de la descarbonización, que incluya los denominados indicadores de progreso y unos hitos, unos valores previstos para lograr el objetivo de neutralidad climática, en 2030, 2040 y 2050 que permitan conocer la estrategia desarrollada y cómo se está alcanzando o no con el tiempo. En 2024 la revisión de la EPBD [63] estableció un marco de indicadores obligatorios y opcionales para todos los países miembros, además de los que voluntariamente desearan aportar.

El desarrollo de las hojas de ruta y el cálculo de los indicadores de progreso constituye actualmente un reto para los estados miembros. El establecimiento de un marco de indicadores de progreso que abarque desde su selección, hasta la metodología y sus fuentes para poder calcularlos ha sido un reto en el que los estados miembros se encuentran actualmente inmersos.

3.1. Estado del arte de los indicadores de progreso

3.1.1. El estado de la edificación y el progreso en la rehabilitación del parque edificado en Europa y España

Se estima que en Europa el 85% de los edificios existentes, aproximadamente 111 millones de edificios [6], han sido construidos antes de 2001 y seguirán en uso en 2050 [58]. Estos edificios presentan en su mayor parte características comunes de falta de aislamiento y de eficiencia energética grave y no están preparados para las nuevas exigencias que les demandará el cambio climático [70]. En este contexto, la rehabilitación del parque construido se erige como una prioridad urgente y una oportunidad clave para transformar el entorno urbano europeo.

Además de contribuir a la descarbonización y a la mejora de la eficiencia energética, la rehabilitación ofrece múltiples beneficios sociales y económicos, como la creación de empleo, la mejora del bienestar y la reducción de los costes energéticos para los hogares [71]. Esto es particularmente relevante para los 34 millones de ciudadanos europeos en situación de pobreza energética [7].

La tasa media de rehabilitación de edificios en Europa, a fecha de 2017, fue de un 1% [72]. La mitad de las rehabilitaciones realizadas obtienen importantes ahorros energéticos y solamente la quinta parte de ellas, un 0,2%, son rehabilitación profunda [73] (*Deep renovation*), intervenciones que mejoran el comportamiento energético de los edificios en al menos un 60% [74]. El objetivo de la *Renovation Wave* es al menos duplicar la tasa de rehabilitación y tratar de alcanzar un 3% de rehabilitaciones anuales [75].

Aun con estos datos sobre el avance de la rehabilitación, su impacto en las emisiones ha sido muy positivo, tal y como muestra el informe de la *European Environment Agency* (EEA) [76], destacando la reducción de las emisiones en los países nórdicos y la influencia que ha tenido la adopción de los *district heatings*, los cuales a menudo utilizan biomasa.

En la figura 3 se muestra la evolución de las emisiones de GEI en el sector de la edificación en países de la UE en 2022 comparado con 2005, y futuras tendencias con las medidas actuales y aplicando medidas adicionales, apreciándose las reducciones medias de emisiones en cada EM y cómo se ha reducido un 31% las emisiones de los edificios de media entre los 27 miembros de la UE. Conviene destacar el fuerte potencial de descarbonización que marcan las proyecciones de mejora, en particular para países como España o Alemania, con grandes cantidades de edificios construidos.

El progreso de la rehabilitación en España, aun con un gran potencial, permanece muy por detrás de los objetivos establecidos. En la figura 3 se muestra cómo su reducción de emisiones está a la cola de Europa con un 21% y su tasa de rehabilitación se sitúa en un 0,1% [77], muy por detrás de la media europea y de los objetivos fijados, siendo una prioridad fomentar la rehabilitación energética del parque edificado.

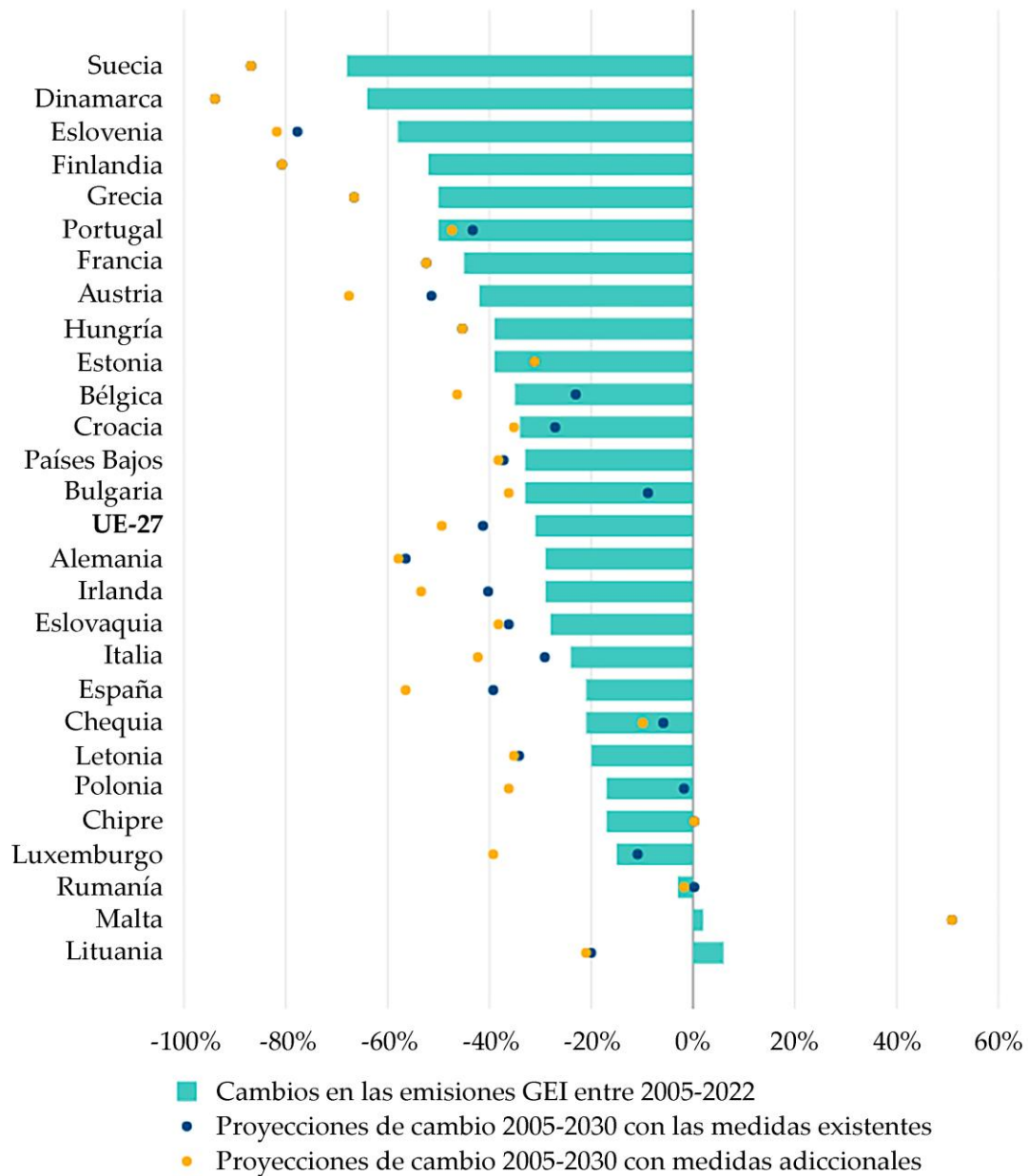


Figura 3. Evolución de las emisiones de GEI provenientes del uso de energía fósil en el sector de la edificación en los EM: cambio porcentual (2005-2022) y futuras tendencias si solo se mantienen las medidas existentes y si se implementan las medidas adicionales. Imagen de: EEA, Greenhouse gas emissions from energy use in buildings by country [78].

Como se comenta en [79], existe una gran falta de información sobre el progreso de la rehabilitación energética de los edificios en el ámbito rural, con datos disponibles de solamente 8 de las 17 Comunidades Autónomas (CCAA). En la tabla 2, se puede apreciar esa falta de datos y la reducida tasa anual de rehabilitación de edificios y viviendas en el mundo rural, muy por detrás de las medias y objetivos europeos.

Tabla 2. Tasa anual de rehabilitación de edificios y viviendas en el medio rural. Fuente: Tabla extraída de [79].

	Tasa anual de rehabilitación de edificios en el medio rural (%)	Tasa anual de rehabilitación de viviendas en el medio rural (%)
Andalucía	-	-
Aragón	0,26	0,02
Principado de Asturias	0,36	0,10
Islas Baleares	0,40	0,20
Islas Canarias	0,10	0,03
Cantabria	0,10	0,02
Castilla y León	-	-
Castilla La Mancha	-	-
Cataluña	-	-
C. Valenciana	0,24	0,02
Extremadura	-	-
Galicia	0,17	0,03
C. de Madrid	0,01	0,04
Región de Murcia	-	0,25
C.F. de Navarra	-	-
País Vasco	-	-
La Rioja	-	-
Media	0,21	0,10

Los datos ponen de manifiesto la necesidad de fomentar la rehabilitación de los edificios, que sigue muy por detrás de los objetivos europeos y de conocer cómo está avanzando. Saber qué necesidades tienen los edificios, por su localización o características, y cómo debemos diseñar y evaluar las estrategias de rehabilitación que llevemos a cabo es crucial para poder impulsar una rehabilitación eficiente que permita actuar de forma adecuada para descarbonizar el parque edificado.

3.1.2. Evolución de los marcos europeos de indicadores de progreso

Cuatro marcos de indicadores se han definido entre 2018 y 2024, con profundas variaciones desde su concepción inicial. En el texto refundido de la EPBD del 2018, donde se solicitaban por primera vez, los EM deben de forma autónoma decidir y desarrollar su propio conjunto de indicadores de progreso.

Posteriormente, en 2019, la Recomendación de la Comisión (UE) 2019/786 [54] planteó el primer marco común de indicadores de progreso, un sistema estructurado que define un conjunto de ellos para monitorizar el progreso organizado en 12 dominios diferentes, es decir, áreas de conocimiento a estudiar a través de los indicadores. Al ser una recomendación, los EM podían elegir los indicadores a desarrollar entre los propuestos, así como desarrollar otros más.

En las propuestas para la enmienda de la EPBD realizadas entre 2021 y 2023 [60], [61] y [62] se realizaron nuevos marcos con diferentes conjuntos de indicadores de progreso, clasificados en obligatorios y opcionales y con dominios específicos en temas de especial interés como la pobreza energética.

Finalmente, en la EPBD de 2024 [63], se establece el marco de indicadores actual, con indicadores obligatorios y opcionales para todos los países miembros.

Este cambio de 2018 a 2024 tiene unas consecuencias muy relevantes en la medición de la descarbonización. Al establecerse un marco general a escala supranacional, se permite la comparación de estrategias y políticas y el avance de la descarbonización entre los diferentes EM.

Como se analiza en [69] los indicadores de progreso y los objetivos que persiguen han variado fuertemente en los sucesivos cambios de la normativa, tanto en número, pasando de 71 a 135⁴, como en los dominios en los que se engloban.

Su organización ha variado desde una clasificación centrada en los dominios de descripción del parque edificado, barreras afrontadas y principales beneficios obtenidos; a una estructura organizada en los dominios de descripción del parque edificado, hoja de ruta para 2030, 2040 y 2050 y las políticas y medidas que se van a adoptar.

Algunos aspectos específicos cobraron gran fuerza en las propuestas de 2021 y 2023, como la pobreza energética, pero en la versión aprobada finalmente en el 2024 perdieron gran parte de la importancia a favor de los *Zero Energy Buildings* (ZEB).

La tabla 3 muestra cómo han variado los marcos de indicadores de progreso con la evolución de las normativas y de las propuestas intermedias. Se indica a su vez cuántos indicadores se han mantenido, modificado, añadido o eliminado respecto al marco de indicadores anterior.

⁴ Nota: En el anexo II de la EPBD de 2024 aparecen un total de 121 indicadores de progreso al englobar en varios de ellos el requerimiento de número de edificios y de superficie total (m²), para poder establecer el mismo criterio homogéneo de análisis en todos los marcos, se ha desglosado en dos cada uno de esos indicadores resultando en un total de 135 indicadores.

En la tabla 3 se aprecia el aumento en el número de indicadores y cómo, con cada modificación, al variar los dominios, un gran número de ellos han ido apareciendo y desapareciendo conforme avanzaba el debate y se priorizaban unas áreas sobre otras.

Tabla 3. Comparación de los marcos de indicadores de progreso a lo largo de su evolución en las EPBD. Elaboración propia.

	Recomendación de la Comisión (UE) 2019/786 [54]	Propuesta de 2021 para la revisión de la EPBD en comparación con la Rec. (UE) 2019/786 [60]	Propuesta de 2023 para la revisión de la EPBD en comparación con la propuesta de 2021 [62]	Texto refundido de la EPBD de 2024 [63]
Número total de dominios	12	4	5	7
Número total de indicadores	71	118	156	135
Indicadores obligatorios	0	76	124	89
Indicadores opcionales	71	41	32	46
% de indicadores obligatorios	0	66	79	66
Indicadores existentes	-	11	89	101
Indicadores modificados	-	29	23	6
Indicadores añadidos	-	78	44	28
Indicadores eliminados	-	36	6	46

A su vez, la figura 4 muestra su variación de los por dominios, viendo cómo los indicadores se han duplicado desde la recomendación de 2019 hasta las diferentes versiones de la refundición de la EPBD.

Como se observa en la figura, los cambios en los dominios han variado fuertemente. La descripción del parque edificado permanece siempre como el ámbito predominante, mientras que el enfoque centrado en barreras y beneficios que se encontraba desglosado en múltiples áreas ha sido enteramente reformulado en función de un análisis basado en los planes y políticas a desarrollar.

3. Base teórica y estado del arte

3.1. Estado del arte de los indicadores de progreso

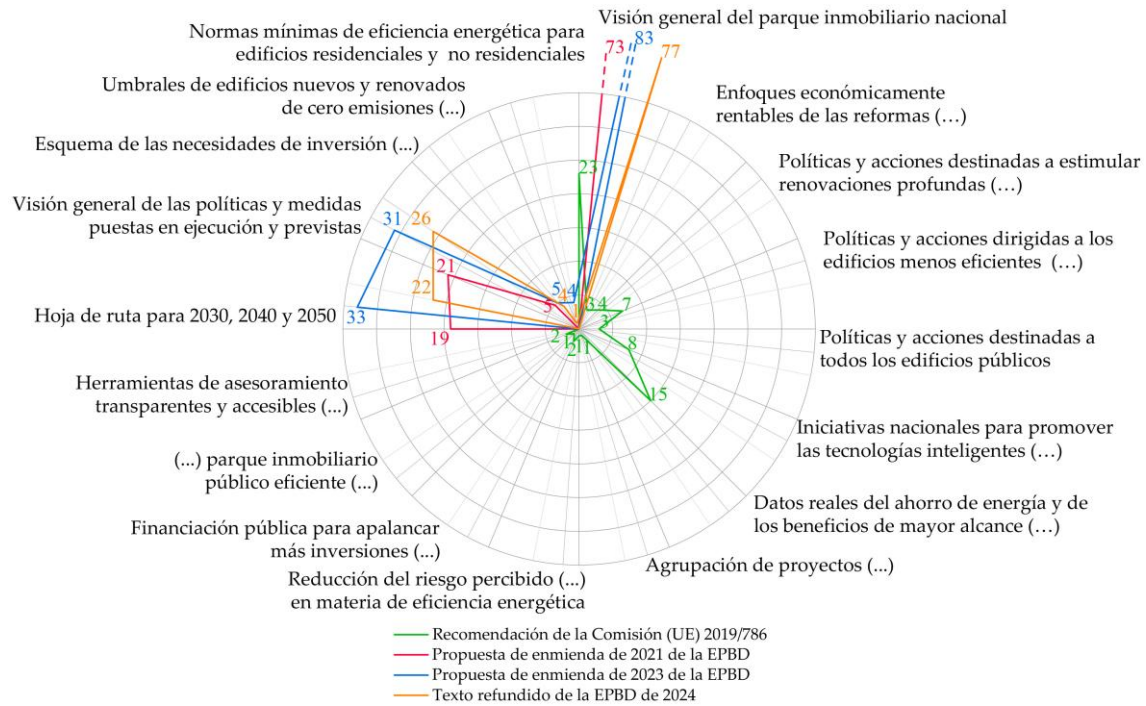


Figura 4. Evolución del número de indicadores por dominio en los avances de la directiva europea. Elaboración propia, actualización de la figura publicada en [80].

Tabla 4. Estructura y número de indicadores obligatorios y opcionales del Anexo II del texto refundido de la EPBD de 2024 [63]. Elaboración propia.

Dominiu	Nº de indicadores obligatorios	Nº de indicadores opcionales	Total
a) Visión general del parque inmobiliario nacional	46	31	77
b) Hoja de ruta para 2030, 2040 y 2050	16	6	22
c) Visión general de las políticas y medidas puestas en ejecución y previstas	17	9	26
d) Esquema de las necesidades de inversión, las fuentes presupuestarias y los recursos administrativos	4	0	4
e) Umbrales de edificios nuevos y renovados de cero emisiones, a que se refiere el artículo 11	4	0	4
f) Normas mínimas de eficiencia energética para edificios no residenciales	1	0	1
g) Normas mínimas de eficiencia energética para edificios residenciales	1	0	1

En el anexo A, en la tabla A.1. se muestra la evolución completa de los indicadores de progreso en los diferentes marcos europeos con los indicadores añadidos, modificados y eliminados en cada cambio. El principal dominio que se ha mantenido en todas las propuestas es el relativo a la visión general del parque edificado. En la tabla 4 se muestra la organización del marco de indicadores de la directiva EPBD de 2024 por dominios, donde el principal con más de la mitad de los indicadores es de la visión general del parque inmobiliario nacional. Este dominio tiene como objetivo conocer el estado del parque edificado y sus características, ya que son aspectos clave para poder rehabilitarlo de forma efectiva.

3.1.3. Estado de los indicadores de progreso en Europa

En esta sección se actualiza un estudio previo [69], realizado en con el objetivo de conocer el desarrollo de los indicadores de progreso por parte de los EM de la UE. En el estudio anterior, se evaluaron las actualizaciones de 2020 de las LTRS de los países, estudiando los indicadores que han aportado, su grado de desarrollo y si se alinean con los planteados en la propuesta del texto refundido de la EPBD de 2023 [62], la propuesta con el número de indicadores de progreso más amplio. En esta sección se va a estudiar los indicadores aportados por los EM del texto de la EPBD de 2024 [63], la directiva en vigor.

En la figura 5 se muestra el número de indicadores que cada estrategia europea ha aportado de los incluidos en el marco de la EPBD de 2024. Basados en la siguiente clasificación:

- Indicadores equivalentes: Es el indicador de progreso de la EPBD o uno muy cercano.
- Indicadores similares: El indicador es parecido, pero está enfocado de forma diferente con lo que no sería compatible con el propuesto. Por ejemplo, indicadores que se plantean separados por residencial o terciario y se ofrece un valor único.
- Cada indicador se evalúa según su grado de desarrollo. Si únicamente se indica su nombre se cataloga como incluido, si incluye una definición y unidades de medida se cataloga como definido y si incluye hitos de progreso a alcanzar se cataloga como hitos.

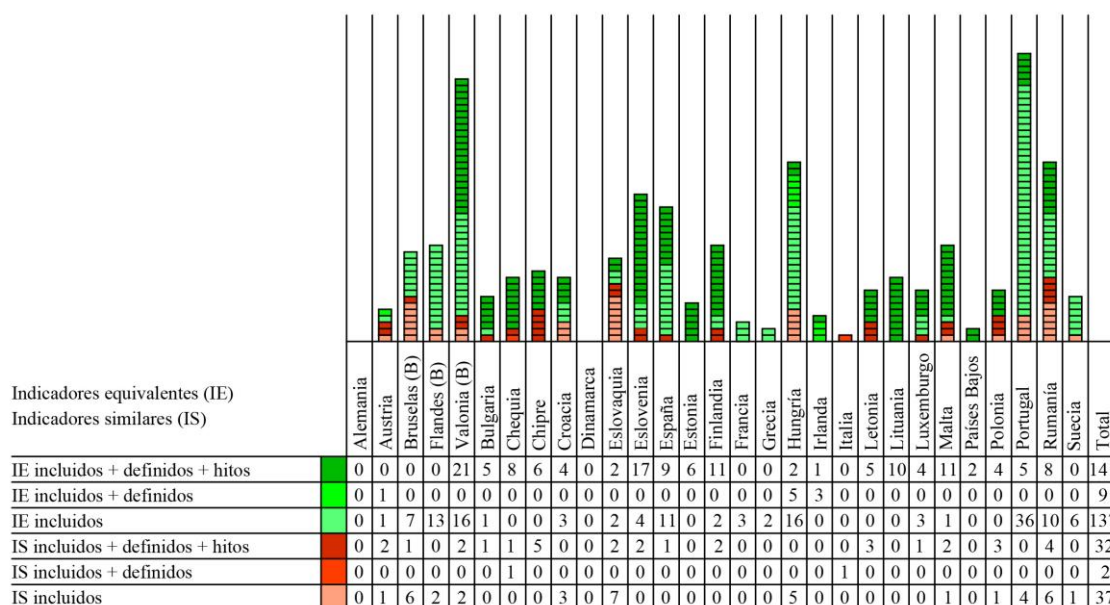


Figura 5. Número de indicadores de progreso aportados por los países de la UE en sus LTRS.
Elaboración propia, actualización de la figura publicada en [80].

Como puede apreciarse en la figura 5, existe una fuerte variación en la cantidad y el grado de desarrollo de los indicadores de progreso aportados por los EM. Variando desde países como Portugal con 45 indicadores de progreso propuestos hasta Alemania que indica en su directiva que se definirán en la siguiente actualización de su estrategia.

Con base en los datos recopilados, las LTRS se agruparon en cuatro categorías según su nivel de desarrollo y alineación con la propuesta de la EPBD:

1. **LTRS con un bajo número de indicadores o con una alineación muy baja.** Este grupo incluye países como Dinamarca y Alemania, o Italia, que solo propuso un indicador ligeramente alineado.
2. **LTRS con un gran número de indicadores propuestos, pero aún pendientes de desarrollo.** Aquí se encuentran países como Portugal (45 indicadores), Hungría (28) o Flandes (15). Aunque estos países identifican y consideran muchos indicadores alineados con la propuesta de la Directiva, no los desarrollan en profundidad, ya que no incluyen definiciones adecuadas que permitan comprender el objetivo y la metodología de cada indicador ni hitos para evaluar su progreso.
3. **LTRS con un marco ya maduro.** Este grupo incluye países como Valonia (41 indicadores), Rumanía (28), Eslovenia (23) España (21), y Finlandia (15). Estas estrategias, además de contener un buen número de indicadores alineados con la propuesta de la Directiva, los definen claramente y proporcionan en algunos casos hitos para su evaluación.

4. **LTRS enfocadas en temas específicos ampliamente desarrollados.** Este grupo incluye países que destacan por abordar en gran detalle cuestiones relevantes en su contexto nacional. Por ejemplo, Rumanía da gran importancia a la evaluación de la pobreza energética, mientras que Luxemburgo se centra en caracterizar los aspectos técnicos de su parque edificado.

El análisis completo de qué indicadores ha aportado cada LTRS está desarrollado en la tabla A.2. del Anexo A.

De los 135 indicadores de la EPBD de 2024, el país que más indicadores incluyó fue Portugal con 45 y con más indicadores definidos y con hitos fue la región de Valonia en Bélgica, donde cada región presenta su propia LTRS, con 23 indicadores equivalentes o similares completamente desarrollados. Sin embargo, es notoria la gran falta de indicadores de progreso en la totalidad de las LTRS, teniendo solamente 8 estrategias de las 29 analizadas al menos 10 indicadores de progreso completamente desarrollados, un 7,4% de los indicadores totales propuestos.

En un estudio anterior, [81] se analizó la alineación de las LTRS nacionales con el marco de indicadores de progreso de la Recomendación de 2019, obteniendo unos resultados igualmente marcados por la falta de indicadores de progreso, siendo también las estrategias con mayor cantidad de indicadores de progreso indicados Portugal, Valonia y Hungría. Aunque cabe destacar el caso de Portugal que prácticamente enumera los indicadores de la Recomendación de 2019 pero no los desarrolla más allá de su intención de aportarlos.

De este análisis se concluye que la mayoría de los países aún necesitan realizar un esfuerzo significativo para adaptar sus estrategias a los nuevos requisitos de los PNRE. Sin embargo, aquellos que ya han comenzado a definir los indicadores, detallar su metodología e incluir hitos mensurables para alcanzar las metas de rehabilitación y descarbonización tienen una ventaja relevante ya que la organización de la recopilación de los datos y su cálculo es largo y complejo.

Los países con sistemas de indicadores más desarrollados en la actualidad (aquellos con más indicadores completamente alineados y desarrollados) son Valonia (21), Eslovenia (17), Malta (11), Finlandia (11) y Lituania (10), España (9) y Rumanía (8). Esto está en línea con el informe del BPIE [31], donde se analiza la calidad de las LTRS. En dicho informe, solo se evaluaron las estrategias presentadas hasta el momento de su elaboración (14), entre las cuales destacaron las de España y Finlandia, que obtuvieron las puntuaciones más altas junto con la de Flandes.

Es importante señalar las barreras para generar indicadores de progreso que las propias LTRS indican, siendo la principal la falta de coordinación institucional

y de infraestructuras para recopilar información. Destacando la LTRS de Valonia [82] el esfuerzo que ha conllevado el desarrollo de su infraestructura, así como Lituania [65] y Bulgaria [66], que están afrontando este problema mediante la definición de una organización responsable de proporcionar la información requerida, y Francia [64] que subraya esta importante barrera como un aspecto fundamental a mejorar para poder obtener los indicadores de progreso.

3.1.4. Estado de los indicadores de progreso en España

En particular en España en el año 2020 se elaboró la Actualización 2020 de la Estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España [5], donde se incorporaron por primera vez los indicadores de progreso. En esta directiva se aportan los indicadores de los objetivos de reducción de consumo de energía final y de emisiones por sectores y sus hitos intermedios para 2030 y 2040, y en el texto del análisis actual del sector de la edificación, aunque no se los denomina como tal, se incorporan datos que son en la práctica varios de los indicadores de progreso requeridos por la UE.

Sin embargo, en cuanto a los indicadores de progreso, que en la versión en español se denominan indicadores de seguimiento, la estrategia únicamente aporta un listado de indicadores de progreso, enunciando solamente sus temáticas, sin definirlos ni aportar datos. Estos indicadores, son un total de veintiuno: ocho para el sector residencial, tres para el sector terciario, tres para las administraciones públicas y siete indicadores para el seguimiento de las inversiones de la Administración General del Estado. Al realizarse la actualización de la estrategia tomando como referencia al texto de la EPBD de 2018, los indicadores que se plantean han sido propuestos por el país y no se alinean con los marcos de indicadores de progreso posteriores, con lo que se adaptarán en el futuro PNRE español.

Un hecho particular es que, aunque comparativamente con el resto de LTRS el número de datos que aporta es relativamente alto: 10 indicadores completamente desarrollados y 11 solamente definidos, no dejan de ser un 15,6% de los indicadores totales requeridos.

Además, los indicadores desarrollados por la estrategia no se encuentran recogidos de manera explícita en el apartado específico de indicadores de seguimiento, sino que se distribuyen en otras secciones de la LTRS. Esto refleja una cierta dispersión de la información, lo que dificulta su consulta y análisis de forma estructurada y sistemática.

Este contexto pone de relieve el buen desarrollo de infraestructuras de datos existentes en el país para estudiar el parque edificado, situándolo en una posición favorable respecto a otros países. Sin embargo, persiste una falta de

aprovechamiento real y práctico de esta información, lo que impide alcanzar un nivel de conocimiento más profundo y completo del parque edificado nacional.

Contar con un conocimiento más detallado permitiría llevar a cabo análisis avanzados y diseñar estrategias sólidas, basadas en datos, para la descarbonización de los edificios. Asimismo, facilitaría la evaluación de los avances logrados, la identificación de beneficios concretos y la detección de barreras que obstaculizan la transición hacia un parque edificado más sostenible.

3.1.5. Metodología para analizar la calidad de los indicadores de progreso en España

Para poder analizar el avance de la rehabilitación energética y la descarbonización en España es necesario poder obtener información para calcular los indicadores de progreso. Por ello, aunque no se aportasen en la actualización de la ERESEE de 2020, se ha evaluado si el indicador está actualmente disponible por algún organismo oficial, si es desarrollable con base en la información disponible, sus fuentes de información y sus características sobre si: son datos en abierto, el tipo de información, si son datos procesables por máquinas, si están georreferenciados y su frecuencia de actualización.

En el libro *Assessing Progress in Decarbonizing Spain's Building Stock: Indicators and Data Availability* [83], elaborado por investigadores de la Universidad de Zaragoza, la Universidad del País Vasco y la Universidad Europea de Madrid, y en el que se ha participado en una serie de capítulos durante esta investigación, se ha desarrollado un amplio análisis de la disponibilidad de datos para obtener los indicadores de progreso en España. En las siguientes subsecciones se va a emplear la clasificación de los indicadores por áreas de conocimiento empleada en el libro:

- Características generales del parque edificado nacional.
- Características energéticas del parque edificado nacional.
- Descripción general del estado de la rehabilitación profunda de los edificios.
- Descripción general de los segmentos con peor comportamiento energético del parque edificado nacional, las propiedades en alquiler y la pobreza energética.
- Descripción general de las capacidades de los sectores de la construcción, la eficiencia energética y las energías renovables.
- Descripción general de los ahorros energéticos reales y los beneficios adicionales de la rehabilitación de edificios.
- Estimación basada en evidencias de los ahorros energéticos esperados y de la reducción de costes para los sistemas de salud derivados de la rehabilitación de edificios.

- Políticas y medidas para la movilización de inversiones para rehabilitación de edificios.

Esta clasificación, basada en los dominios de los diferentes marcos de indicadores de la EPBD, permite conocer el objetivo de estos indicadores de forma más clara que por los dominios de los diferentes marcos de indicadores y permite obtener unos datos compatibles con posteriores evoluciones de la EPBD.

En la subsección siguiente se van a detallar las principales conclusiones obtenidas que servirán de apoyo a esta investigación.

La metodología para este análisis consistió, en estudiar los datos disponibles y las posibles fuentes de datos en España, se desarrollaron los indicadores cuando fue posible y se analizaron, junto con las fuentes, siguiendo los criterios establecidos en [83]. Finalmente, se realizó un análisis de los resultados para alcanzar conclusiones.

La metodología utilizada para analizar la disponibilidad y calidad de los datos se estructuró en tres etapas principales: definición de criterios, estudio de fuentes de datos en España y análisis de los resultados.

Para medir la disponibilidad de datos a nivel de indicador, se empleó el concepto de viabilidad del desarrollo del indicador, que evalúa la facilidad de recopilar datos para su creación mediante tres parámetros:

1. Disponibilidad de datos: Clasificada en totalmente disponible, parcialmente disponible (cuando faltan algunas variables o datos temporales) y no disponible.
2. Método de procesamiento: Directo (datos publicados tal como se necesitan) o indirecto (requiere cálculos adicionales u otra información para obtener el indicador).
3. Procesabilidad de los datos: Evaluada en tres niveles: sí (formato legible por máquina, como CSV o JSON), parcialmente (algunos datos legibles) y no.

Adicionalmente, la calidad de las fuentes de información se evaluó mediante:

- Procesabilidad: Clasificada como sí o no, según si los datos de la fuente son legibles por máquina.
- Georreferenciación: Determina si los datos incluyen información geográfica (sí o no).
- Frecuencia de actualización: Evaluada según diez posibles frecuencias, destacándose problemas en fuentes con actualizaciones mayores a cinco años o publicaciones únicas.

La figura 6 resume la información desarrollada para analizar la viabilidad de los indicadores de progreso.

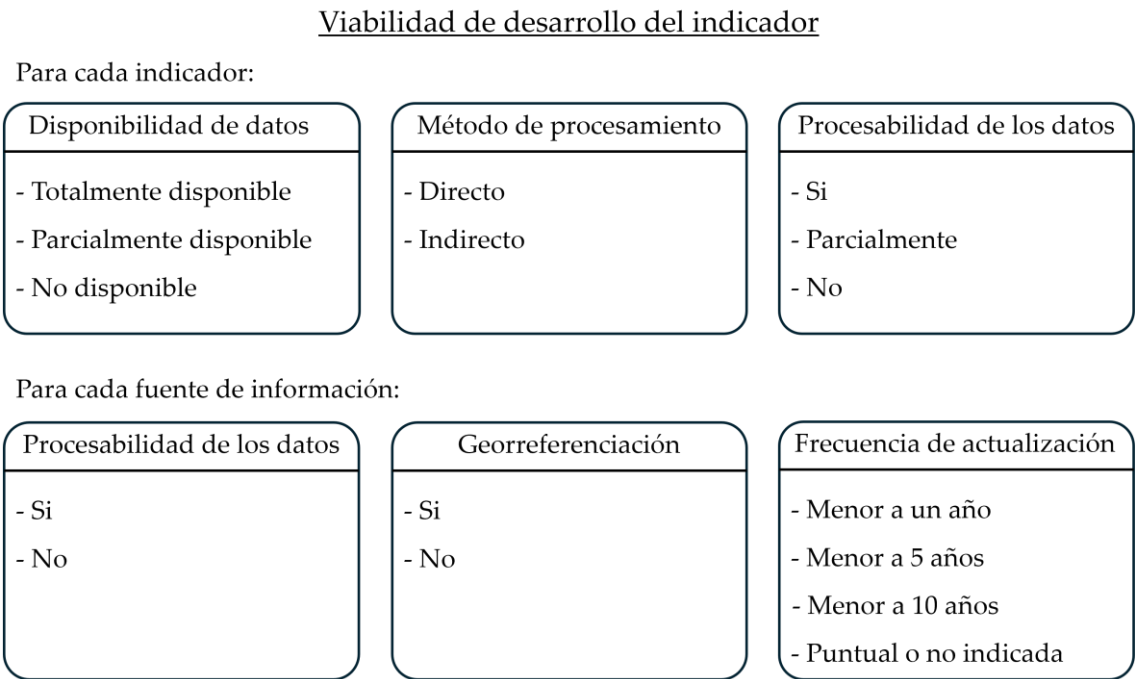


Figura 6. Esquema de análisis de la viabilidad de desarrollo de los indicadores. Elaboración propia basada en libro *Assessing Progress in Decarbonizing Spain's Building Stock: Indicators and Data Availability* [83].

3.1.6. Análisis de los indicadores de progreso en España y su disponibilidad

El análisis de los indicadores de progreso en España muestra desafíos significativos relacionados con la baja disponibilidad de datos para obtenerlos, en especial sobre las temáticas de rehabilitación profunda de edificios y las políticas para movilizar inversiones para rehabilitación [30]. Los resultados revelan desafíos significativos, como la complejidad en el procesamiento de datos, un 42% de indicadores directamente procesables y un 58% que requieren métodos indirectos, la baja georreferenciación (9%) y frecuencias de actualización insuficientes (54% superiores a cinco años), además de una alta proporción de indicadores que requieren métodos indirectos (58%). Estas limitaciones resaltan la necesidad de mejorar las fuentes de datos para facilitar el desarrollo de indicadores relacionados con la descarbonización y la efectividad de las políticas de rehabilitación de edificios.

En cuanto a viabilidad del desarrollo de los indicadores en España. Los resultados muestran que:

- El 17% de los indicadores son completamente desarrollables, el 41% parcialmente y el 42% no son desarrollables.
- Las temáticas con menor disponibilidad de datos son:
 - Rehabilitación profunda de edificios (70% de indicadores no desarrollables).
 - Políticas para movilizar inversiones en rehabilitación de edificios (85% no desarrollables).
- Entre los indicadores desarrollables total o parcialmente:
 - El procesamiento de datos es directo en el 42% e indirecto en el 58%.
 - La procesabilidad es total en el 61%, parcial en el 5% y nula en el 34%.

En cuanto a la calidad de las fuentes de información, se identificaron las principales fuentes de datos en España a nivel nacional. Entre las principales fuentes nacionales se incluyen:

- Instituto Nacional de Estadística (INE), Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Observatorio Ciudad 3R, Ministerio de Hacienda y Función Pública, y el Catastro Español.

Según el análisis de calidad de las fuentes de información:

- El 63% de las fuentes son procesables y el 37% no lo son.
- Solo el 9% de los datos están georreferenciados, lo que resulta crucial para análisis geoespaciales.
- En términos de frecuencia de actualización, el 46% de los datos tienen una frecuencia suficiente, considerada desde a tiempo real hasta cada cinco años, mientras que el resto presenta carencias en la actualización de los datos.

Se considera que una frecuencia de cada cinco años es el límite aceptable, ya que los indicadores deben integrarse en los Planes Nacionales de Renovación de Edificios, actualizados cada cinco años. Sin embargo:

- El 23% de los datos se actualizan cada diez años.
- El 31% pertenece a publicaciones únicas o tiene frecuencias no especificadas, lo cual es inadecuado para monitorizar y evaluar las políticas.
- Solo el 36% de los datos se actualizan con la frecuencia recomendada de al menos una vez al año.

Estos resultados reflejan importantes desafíos en la disponibilidad, procesabilidad y calidad de los datos, destacando la necesidad de mejorar las fuentes para desarrollar indicadores clave en la descarbonización y rehabilitación del parque edificado.

Analizando los indicadores obtenibles por cada temática:

1. Características generales del parque edificado nacional. Es el campo con más información disponible, el 29% de los indicadores están completamente disponibles, el 64% pueden ser desarrollados con fuentes de datos adicionales o tratando los datos, y el 7% son no disponibles. Es importante destacar que España cuenta con fuentes de datos relevantes para estos indicadores, pero la falta de homogeneidad en qué datos y cómo se aportan entre estas fuentes conducen a discrepancias, especialmente cuando se realiza un cruce de datos. Por lo tanto, es necesario mejorar la recopilación de datos para que sea, al menos, anual y estandarizar los procesos entre las instituciones a nivel conceptual y metodológico [84].
2. Características energéticas del parque edificado. En relación con los indicadores sobre las características energéticas, ninguno de ellos está completamente disponible, el 83% puede ser desarrollado con más datos o aplicando ciertos tratamientos de datos, y el 17% no está disponible. España dispone de datos regionales sobre el consumo de energía y los CEE, pero estos datos son inconsistentes, lo que dificulta el desarrollo de indicadores. Además de la falta información sobre los Edificios de Consumo de Energía Casi Nulo (EECN). Es fundamental armonizar los datos regionales provenientes de los CEE y comenzar a recopilar información sobre los EECN para cumplir con los objetivos de descarbonización [85].
3. Descripción general del estado de la rehabilitación profunda de los edificios. El 10% está completamente disponible, el 20% parcialmente disponible y el 70% no disponible. La escasez de datos categorizados, particularmente sobre la profundidad de los ahorros energéticos en las rehabilitaciones, impide la creación de una visión completa. Es necesario implementar un proceso de obtención de datos estandarizado y centralizado para diferenciar entre intervenciones ligeras, medias y profundas, a fin de alinearse con los objetivos de descarbonización [86].
4. Descripción general de los segmentos con peor comportamiento energético, alquiler y pobreza energética. El 50% de los indicadores está completamente disponible, el 33% parcialmente disponible y el 17% no disponible. Aunque España dispone de buenas fuentes de datos para la pobreza energética, existen vacíos en la información sobre la población que reside en viviendas térmicamente inadecuadas y sobre la eficiencia energética de las propiedades de alquiler. La estandarización de los datos

provenientes de los CEE y su vinculación con el tipo de tenencia de vivienda (alquiler o propiedad) si estuviese disponible facilitaría la accesibilidad y el cruce de datos [87].

5. Capacidades en construcción, eficiencia energética y renovables. En esta área ninguno de los indicadores está completamente disponible, el 67% está parcialmente disponible y el 33% no disponible. Para garantizar que los sectores de la construcción y la eficiencia energética cumplan con los requisitos evolutivos, los programas universitarios y de formación deben alinearse con las necesidades reales del sector. Además, es necesario mejorar la recolección de datos sobre la adopción de tecnologías inteligentes, las comunidades energéticas y la evaluación de la capacidad administrativa en España [88].
6. Ahorros energéticos reales y los beneficios adicionales de la rehabilitación de edificios. El 21% de los indicadores está completamente disponible, el 29% puede desarrollarse con fuentes de datos adicionales y el 50% no está disponible. La falta de datos completos impide obtener una comprensión detallada de los ahorros y beneficios derivados de las actividades de rehabilitación. Es necesario mejorar la recolección y el análisis de datos para evaluar adecuadamente los ahorros y los impactos más amplios de las rehabilitaciones de edificios [89].
7. Estimación basada en evidencias de los ahorros energéticos esperados y de la reducción de costes para los sistemas de salud derivados de la rehabilitación de edificios. El 50% de los indicadores está completamente disponible y el 50% parcialmente disponible. Aunque las fuentes de datos existentes ofrecen información bastante sólida sobre los ahorros energéticos esperados, sigue existiendo una falta en la información disponible para establecer objetivos precisos relacionados con la reducción de los costes sanitarios vinculados a las medidas de eficiencia energética y las mejoras en la calidad del aire debido a la complejidad de estos indicadores. Esto subraya la necesidad de realizar investigaciones y mejorar las fuentes de datos para evaluar de manera efectiva los beneficios integrales de las medidas de eficiencia energética [90].
8. Políticas y medidas para la movilización de inversiones para rehabilitación de edificios. Esta área destaca por la falta de datos, con el 0% completamente disponible, el 15% parcialmente disponible y el 85% no disponible. La falta de acceso a fuentes de datos impide la creación de la mayoría de los indicadores destinados a medir el éxito de las políticas y estrategias para fomentar la rehabilitación de edificios. Además, la ausencia de diferenciación en los datos recolectados sobre la profundidad energética de las rehabilitaciones impide obtener conclusiones significativas sobre la eficacia de estas políticas en específico [91].

La figura 7 resume los datos obtenidos en cada temática. La evaluación resalta áreas críticas para mejorar la disponibilidad y calidad de datos, especialmente en rehabilitación profunda y en políticas y medidas para la rehabilitación. Además de retos muy relevantes, como priorizar la homogenización, la georreferenciación y la frecuencia adecuada de actualización de los datos es esencial para una evaluación efectiva de políticas y la toma de decisiones basadas en evidencias. Una colaboración estrecha entre responsables políticos, investigadores y proveedores de datos será clave para avanzar hacia los objetivos de sostenibilidad en España y Europa [30].

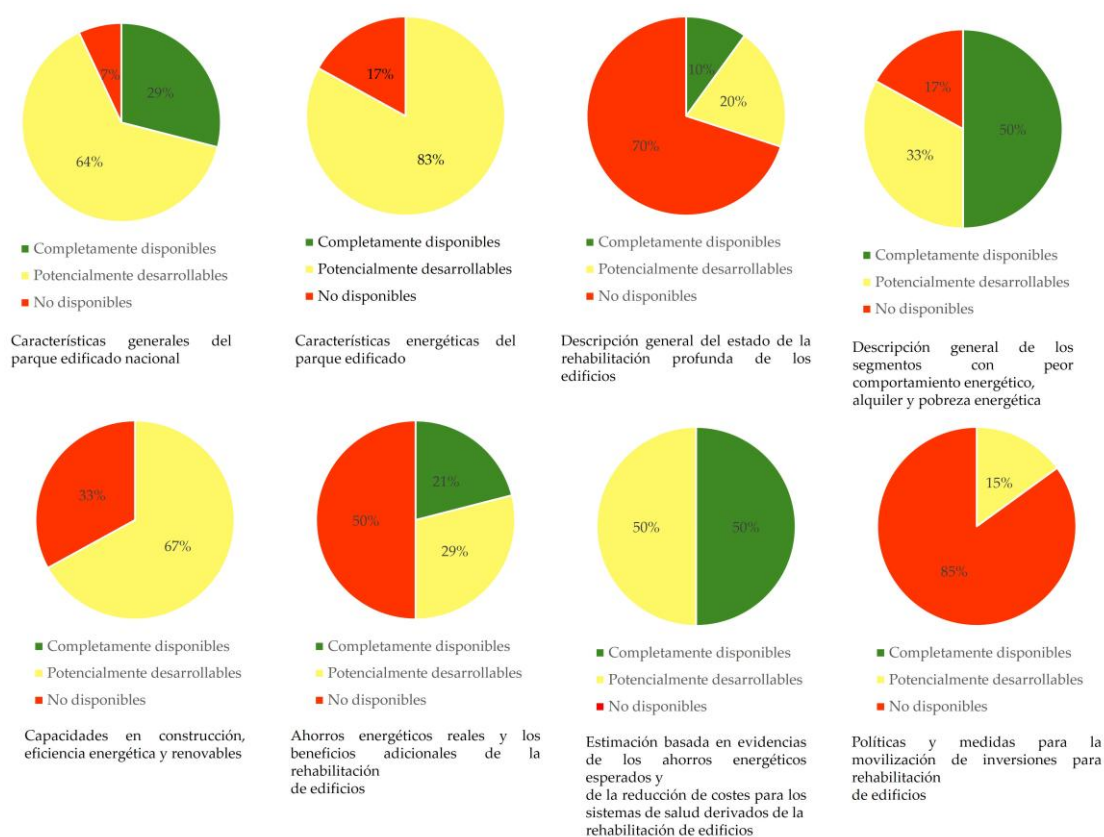


Figura 7. Porcentaje de indicadores completamente obtenibles, potencialmente desarrollables y no disponibles por área temática. Elaboración propia basada en los datos de [83].

De entre las temáticas de los indicadores hay tres centradas en los edificios que disponen de gran cantidad de información, pero que dejan grandes cantidades de indicadores como parcialmente disponibles. En particular estas áreas son las de Características generales del parque edificado nacional, Características energéticas del parque edificado y la Estimación basada en evidencias de los ahorros energéticos esperados y de la reducción de costes para los sistemas de salud derivados de la rehabilitación de edificios. Siendo sus porcentajes un 64%, 83% y 50% respectivamente de indicadores parcialmente

disponibles. Esto es debido a dos razones principales: la falta de datos para obtener los indicadores y la falta de metodologías que permitan tratar los datos de manera efectiva.

Estos aspectos, englobados en el dominio de la visión general del parque edificado en su mayor parte, son unos indicadores fundamentales para poder ampliar nuestro conocimiento del parque edificado, tanto de los características físicas y geográficas como de sus características energéticas. Obtener más datos sobre estos indicadores permitirá desarrollar indicadores que dependen de esta información que no se está aportando, como son los relativos a las estrategias de rehabilitación y los relativos a la pobreza energética.

3.2. Selección y evaluación de indicadores de progreso a desarrollar

De entre los múltiples indicadores de progreso, en esta tesis la investigación se va a enfocar en el desarrollo de los indicadores de progreso relativos a las temáticas de características generales y energéticas del parque edificado nacional analizadas en el subapartado anterior. Debido sobre todo a la necesidad que se aprecia de analizar muchos de sus indicadores y a la disponibilidad de datos en España para poder desarrollarlos pero que actualmente no se obtienen porque no hay metodologías o formas de llegar a calcularlos de manera efectiva. Finalmente, a partir de estos indicadores se pueden obtener otros de temáticas relacionadas que dependen de esta información para poder desarrollarse.

Los indicadores de estas temáticas, aunque con variaciones en cada EPBD, principalmente corresponden al dominio de la visión general del parque edificado en todos los diferentes marcos de indicadores. Las razones para seleccionar estos indicadores a desarrollar son múltiples, pero, como se indica en este apartado, destaca la necesidad actual de obtener un mayor nivel de conocimiento sobre cómo es el parque edificado nacional y su comportamiento energético. El dominio de la visión general del parque edificado es en todas las propuestas de marcos de indicadores de progreso el dominio principal, ya que es el que permite ampliar el grado de conocimiento que tenemos de los edificios. Este dominio ha sido sobre el que ha habido un mayor consenso en todas las revisiones, siendo siempre el mayor y el que menos variaciones ha tenido, ya que la visión general del parque edificado es el punto de partida para desarrollar muchos de los indicadores de los demás dominios en cada propuesta.

Dentro de este dominio se van a desarrollar los indicadores de características generales, que son las características físicas del edificio, por ejemplo, antigüedad, uso, tipología, etc. describen cómo es el edificio, y los indicadores energéticos, que son los que definen el comportamiento energético del parque edificado, por

ejemplo, el consumo de energía o sus emisiones de GEI, cuyos indicadores específicos se muestran en los subapartados siguientes.

Estos aspectos físicos y energéticos permitirán caracterizar el parque edificado y aunque fundamentalmente se encuentran recogidos en la visión general del parque edificado, también servirán de base para apoyar los indicadores de la hoja de ruta de descarbonización y los de las políticas y medidas a implementar.

Del total de indicadores de progreso planteados en la EPBD de 2024, esta tesis se enfoca en el desarrollo de los indicadores de estas temáticas, en el anexo B.1 se detalla el desglose completo de los indicadores del texto refundido de la EPBD de 2024 señalando los indicadores que pertenecen a estas temáticas.

3.2.1. Indicadores de características físicas en edificación

Para poder desarrollar políticas efectivas dirigidas a mejorar o transformar los entornos urbanos y los edificios es esencial comprender cómo son actualmente [10]. Aspectos como la antigüedad de los edificios, su uso, su tipología y el estado de conservación suelen ser definitorios de un barrio, ciudad o territorio y es fundamental comprenderlos para poder intervenir de la manera más eficaz [84].

De los 135 indicadores propuestos en el texto de 2024 de la EPBD, 21 hacen referencia directa a la caracterización física de los edificios, un 15,6% del total. Véase anexo B.1 para el desglose completo de los indicadores.

Aunque no existe una definición oficial de las características generales de los edificios, los indicadores de progreso de la EPBD de 2024 condensan las características físicas de la edificación en los siguientes puntos:

- Número de edificios
- Superficie total en m²
- Tipo de edificio
- Uso del edificio (residencial, no residencial)
- Edificios públicos
- Fecha de construcción

Sobre la base de estas características se solicitan los indicadores. Por ejemplo, el indicador de 'Ahorro de energía' se solicita desglosado en 'Ahorro de energía de los edificios residenciales, de los no residenciales y de los edificios públicos'. O las emisiones de gases de efecto invernadero operativas anuales se solicitan por tipo de edificio.

Como consecuencia, hay características que no se definen de forma expresa, como es el tipo de edificio, que puede dar lugar a definiciones muy diferentes. Además, la falta de precisión sobre el desglose de la información da lugar a

imprecisiones. Por ejemplo, el indicador de emisiones de gases de efecto invernadero operativas anuales se solicita por tipo de edificio y no por zona climática, aunque esta resulte decisiva en las emisiones producidas. Otro ejemplo, que se incluyó en la Recomendación de 2019, es desglosar por número de viviendas en lugar de número de edificios. Este dato es muy relevante ya que permite evaluar con más profundidad los análisis generados evitando el conflicto de considerar las unifamiliares como un edificio a la par que un bloque de viviendas, contando ambas como uno en el indicador de edificios rehabilitados.

Por ello se propone en esta investigación añadir algunos indicadores, no solamente en la información requerida por las directivas europeas, sino ampliar su grado de detalle de forma que puedan aportar un conocimiento más detallado y preciso del parque edificado.

Un ejemplo de esto es la caracterización del parque edificado en:

- Número de edificios
- Número de viviendas
- Superficie total en m²
- Tipología de edificio (manzana, bloque lineal, edificio exento, etc.)
- Uso del edificio (residencial, comercial, industrial, etc.)
- Fecha de construcción (año de construcción, año de rehabilitación, tipo de rehabilitación)
- Tamaño del edificio (superficie, número de plantas, compacidad)
- Zona climática donde se encuentra (georreferenciación del edificio)

3.2.2. Indicadores de características energéticas en edificación

Las características energéticas son un aspecto crucial para conocer junto a las características físicas de la edificación. Determinar su comportamiento energético: cuánta energía consume y cuántos gases de efecto invernadero emite son datos claves para poder elaborar estrategias de descarbonización del parque edificado.

Los indicadores de características energéticas están condensados en los siguientes aspectos:

- Número de Certificados de Eficiencia Energética
- Clases de eficiencia energética
- Edificios menos eficientes (número de edificios y m² construidos)
- Identificación del 43% de los edificios residenciales menos eficientes
- Consumo anual de energía primaria y final
- Número de m² de Edificios de Consumo Energético Nulo y Edificios de Consumo Energético Casi Nulo (y su definición)
- Consumo medio de energía primaria en edificios residenciales
- Ahorro de energía obtenido en las rehabilitaciones

- Reducción de los costes energéticos (EUR) por hogar (media)
- Emisiones de gases de efecto invernadero operativas anuales
- Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero operativas anuales

Véase anexo B.1 para el desglose completo de los indicadores. A los que se suman otros directamente vinculados como la pobreza energética o el Potencial de Calentamiento Global (PCG).

De los 135 indicadores propuestos en el texto de 2024 de la EPBD, 50 tratan sobre temas relacionados con la energía en la edificación, un 37% del total, abarcando desde la descripción de los edificios, la hoja de ruta, la definición de los estándares mínimos de eficiencia energética (MEPS por sus siglas en inglés, *Minimum Energy Performance Standards*) hasta la definición de los Edificios de Consumo Energético Nulo (*Zero Energy Buildings*, ZEB).

3.3. Oportunidades en el Open Big Data y los modelos UBEEM para responder al reto del desarrollo de los indicadores de progreso

Como se ha visto en el análisis de los indicadores de progreso, existe una gran brecha de conocimiento todavía por cubrir para poder calcular gran parte de los indicadores de progreso y, para ello, el uso de nuevas tecnologías ofrece grandes capacidades para aprovechar al máximo los datos disponibles y poder cubrir los vacíos de información existentes en la actualidad.

Las tecnologías emergentes poseen un gran potencial para mejorar de manera significativa tanto la disponibilidad como la calidad de los datos en diversas áreas. Por ejemplo, dispositivos del Internet de las Cosas (IoT), sensores y herramientas automatizadas de recopilación de datos permiten la recolección continua de datos en tiempo real, lo que reduce la dependencia de la entrada manual de información y minimiza los errores humanos [92]. Las herramientas avanzadas de análisis y las tecnologías de Big Data facilitan el procesamiento eficiente de grandes volúmenes de datos, permitiendo la identificación de patrones y anomalías que no son fácilmente detectables mediante métodos tradicionales. Estas tecnologías ofrecen amplias posibilidades para su aplicación en la reducción de la huella de carbono en edificios [93].

Además, los avances en Inteligencia Artificial (IA, *Artificial Intelligence*), mediante, por ejemplo, los algoritmos de aprendizaje automático (*Machine Learning*, conocido por sus siglas en inglés ML) contribuyen a la mejora de la calidad de los datos al detectar errores, inconsistencias y valores atípicos.

Dentro de los diferentes campos que abarca la IA, en esta tesis se adopta una visión centrada en la IA como el conjunto de técnicas computacionales que permiten a un sistema aprender patrones a partir de datos y realizar predicciones o tomar decisiones sin intervención humana explícita. En particular, este trabajo se enfoca en el uso de métodos de aprendizaje supervisado, donde el modelo se entrena con datos de entrada y salidas conocidos. Por tanto, la definición adoptada de IA para esta tesis se centra en su capacidad predictiva y de modelización, orientada a problemas urbanos y energéticos, donde el aprendizaje automático supervisado es la herramienta clave para transformar datos en conocimiento útil para la toma de decisiones.

Estos algoritmos también permiten la predicción de valores ausentes [94] a partir de la identificación de patrones de los datos con los que han sido entrenados. El uso de técnicas como la agrupación de datos (*data pooling*), para potenciar la integración de variables provenientes de diversas fuentes puede optimizar la cohesión y paliar la falta de información de los conjuntos de datos [95]. Así mismo, la teledetección y la tecnología satelital proporcionan información valiosa para aplicaciones como la monitorización ambiental y la evaluación de infraestructuras [95]. Iniciativas de datos abiertos, impulsadas tanto por gobiernos como por el sector privado, promueven el intercambio de información, incrementando su disponibilidad para su uso en distintas áreas [96].

El propósito de este apartado es proponer enfoques innovadores que contribuyan a mejorar la disponibilidad y la calidad de los datos necesarios para el desarrollo de indicadores que midan la efectividad de las políticas de rehabilitación de edificios y el avance de la descarbonización del parque inmobiliario en Europa, así como explorar su potencial para alcanzar estos objetivos.

3.3.1. Calidad de los datos para el desarrollo de indicadores

Obtener datos fiables, de calidad y en abierto son tres cuestiones fundamentales para poder calcular los indicadores de progreso y conocer el avance de descarbonización del parque edificado.

La importancia de que los EM tengan fuentes de información nacionales que ofrezcan datos de alta calidad es uno de los puntos que destaca en su texto la Recomendación Europea de 2019 [54]. Otros estudios europeos subrayan la problemática que supone la falta de datos en la creación de programas centrados en objetivos específicos, el seguimiento de la implementación de políticas y la evaluación del desarrollo [10] [97], y que los EM deben realizar un importante esfuerzo en colmar esos vacíos de información.

Establecer fuentes de información fiables es un desafío presente tanto por los países miembros como por la literatura científica. Este es uno de los puntos clave destacados en las Estrategias a largo plazo de rehabilitación presentadas en 2020 por varios países miembros, que han reconocido las dificultades para calcular los indicadores de progreso y de establecer fuentes de información que cumplan con estas tres características, como es el caso de Francia [64], Lituania [65] y Bulgaria [66], señalando la dificultad en la recolección de datos y el desarrollo de indicadores de progreso.

La recolección de datos suficientes y de calidad es esencial para comprender la efectividad de las políticas implementadas y la forma de incentivar la descarbonización [98]. Un aspecto esencial del desarrollo de estos indicadores implica evaluar inicialmente los recursos de datos disponibles antes de emprender esfuerzos de recopilación que podrían ser costosos [99]. Sin embargo, esta adecuada recogida de información y su análisis posee diferentes retos, entre los que destacan:

1. Fragmentación de datos y falta de interoperabilidad: Los datos suelen recopilarse a nivel regional o municipal sin un formato común nacional, lo que dificulta su combinación para crear información a mayor escala [32].
2. Estructuras de datos dispares: Los datos recopilados de diversas fuentes están en formatos incompatibles, carecen de Interfaces de Programación de Aplicaciones (API) para el acceso directo, lo que complica el análisis a gran escala. Algunos datos se proporcionan en formatos no legibles por máquina, lo que impide la automatización [96].
3. Dificultad para acceder a los datos: Gran parte de la información no es de acceso abierto y requiere una solicitud, lo que bloquea la automatización y actualización constante [100].
4. La información a veces está incompleta o contiene errores que necesitan ser filtrados o corregidos [33].

3.3.2. Directivas e iniciativas europeas para promover los datos en abierto

En la era digital, los datos se han convertido en un recurso muy valioso que impulsa la toma de decisiones, la innovación y el progreso de la sociedad. En particular, los datos en abierto han emergido como un catalizador para la transparencia, la colaboración y la innovación. Para desarrollar indicadores de progreso, es clave contar con fuentes de datos accesibles que ofrezcan de manera fiable grandes cantidades de información sobre una multitud de temas [101]. Las fuentes garantizan transparencia, escalabilidad y fiabilidad, permitiendo medir los avances de manera consistente y comparable. Además, al estar disponibles públicamente, facilitan la colaboración y la supervisión, asegurando que los

indicadores reflejen de forma precisa la realidad y apoyen decisiones basadas en evidencias.

En la UE, existe una fuerte conciencia sobre esta importancia, por lo que se han desarrollado directivas y estrategias para crear y fomentar el *European Interoperability Framework* (EIF) [22] como son la Directiva 2019/1024 relativa a los datos abiertos y la reutilización de la información del sector público (*Public Sector Information directive*, PSI) [102], la Directiva INSPIRE (*Infrastructure for Spatial Information in Europe*) [20], y el Reglamento de Datos 2023/2854 (Data Act) [21], para promover la recopilación y publicación de datos en abierto en Europa. A través de proyectos como el ISA² y el *Digital Europe Programme* se impulsa el diseño de un conjunto de principios, modelos y recomendaciones para el diseño de servicios públicos interoperables [103].

Abrir el acceso a los datos generados por el sector público y establecer estándares de interoperabilidad geoespaciales en la UE promueve un ecosistema de información compartida y colaborativa, lo que facilita la medición de los indicadores de progreso. Además, al proporcionar un marco legal claro y transparente para la gestión de datos en la sociedad digital, la UE fomenta la confianza y la participación en su uso y reutilización, mejorando la capacidad de la sociedad para abordar desafíos actuales y futuros de manera informada y eficaz [104]. En última instancia, estas medidas no solo impulsan la toma de decisiones basadas en evidencias, sino que también fortalecen la democracia al empoderar a los ciudadanos con información, que les permite participar activamente en la formulación y evaluación de políticas públicas y en la transición hacia una economía más verde y resiliente.

El desarrollo de estas directivas ha llevado a la publicación de grandes cantidades de datos en abierto. En la mayoría de los casos, como en la Directiva INSPIRE, se establece que se aporten a través de las infraestructuras propias de los países miembros, si bien con base en una serie de reglas y estructuras comunes. Aunque se cuenta con portales como por ejemplo el INSPIRE Geoportal [105] que ofrece el catálogo de datos europeos en su conjunto, cada información es proporcionada por los países miembros, actualmente de formas dispares.

Esta decisión de no ofrecer los datos de forma centralizada y homogénea desde la propia Unión Europea posee rasgos positivos y negativos. Por un lado, permite adaptar los requisitos de la directiva a los diferentes países, por ejemplo, Portugal no tiene un catastro nacional, sino que algunas regiones son las que lo poseen. Por el otro, plantea una problemática de disparidad entre los datos aportados por cada país, donde se han tomado esfuerzos y decisiones dispares, no siempre llevando a un trabajo homogéneo de todos ellos, como se comenta en [106]. En el caso de la edificación, el conjunto de datos INSPIRE es el más

armonizado de todos los disponibles. Sin embargo, la implementación y disponibilidad varía según el país, impidiendo hoy en día realizar un mapa completo de todos los edificios de Europa.

A pesar de estas problemáticas, en la actualidad, se siguen dando pasos hacia el objetivo de la directiva INSPIRE: Crear una Infraestructura de Información Espacial en Europa (*European Union Spatial Data Infrastructure*, SDI) armonizada e interoperable en todos los países miembros. El *INSPIRE Maintenance and Implementation Group* dirige el proceso de evolución de esta infraestructura, entre cuyos objetivos para el periodo 2021-2024 destacan [107]:

- Desarrollar una visión a largo plazo sobre cómo INSPIRE contribuirá específicamente al espacio de datos del Pacto Verde (*Green Deal Data Space*) y, en general, al espacio común de datos de la UE (*EU Common Data Space*) [18].
- Identificar los conjuntos de datos claves de INSPIRE que pueden ofrecer beneficios tangibles para la política ambiental, el *European Green Deal* u otras prioridades políticas.
- Crear un plan de implementación para ordenar los esfuerzos, priorizando la disponibilidad e interoperabilidad y alcanzar una cobertura espacial paneuropea integral de estos conjuntos de datos claves.

3.3.3. Fuentes de datos nacionales en abierto provenientes de directivas europeas

En el caso concreto de España, hay multitud de fuentes de información que provienen o se encuentran recogidas dentro de leyes nacionales, que trasponen las directivas europeas dirigidas a promover el uso de datos y la toma de decisiones basada en ellos. En este subapartado se van a analizar las fuentes de información españolas que provienen de directivas europeas directamente o están fuertemente influenciadas por las mismas y que, por tanto, se encuentran ya inmersas en las SDI europeas o en proceso de adaptación a las mismas. Estas fuentes de información, si bien nacionales, proporcionan datos de manera análoga a los que aportan o aportarán el resto de los miembros de la Unión Europea conforme el *EU Common Data Space* se vaya desarrollando y se implementen estructuras de datos comunes.

Las fuentes de información oficiales y en abierto fueron identificadas junto con las leyes nacionales que transpusieron directivas europeas dirigidas a promover el uso de datos y la toma de decisiones basada en ellos. Las principales directivas que rigen estas fuentes incluyen la Directiva 2003/98/CE relativa a los datos abiertos y la reutilización de la información del sector público, la Directiva 2007/2/CE (INSPIRE), el Reglamento (UE) 2016/679 relativo a la protección de las

personas físicas en lo que respecta al tratamiento de datos personales y a la libre circulación de estos datos (Reglamento general de protección de datos, *General Data Protection Regulation*), y la Directiva (UE) 2019/1024, el texto refundido de la anterior directiva PSI.

Los datos abiertos identificados en España, sus fuentes públicas y la directiva europea en la que se basa su marco legislativo se resumen en la tabla 5.

Tabla 5. Datos abiertos identificados en España, fuente pública y directiva europea relacionada. Elaboración propia.

Datos en abierto en España	Fuentes públicas de información	Directiva transpuesta en la legislación
Edificios georreferenciados	Catastro INSPIRE español	Directiva 2007/2/CE (INSPIRE) Reglamento (UE) 1089/2010
Información alfanumérica sobre los edificios (uso, año de construcción, número de plantas, etc.)	Catastro español	Directiva 2003/98/CE, Directiva 2007/2/CE (INSPIRE)
Certificados de Eficiencia Energética	Bases de datos autonómicas de Certificados de Eficiencia Energética	Directiva (EU) 2018/844 (EPBD)
Límites municipales, provinciales y autonómicos	Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG)	Directiva 2007/2/CE (INSPIRE)
Estadísticas sobre diferentes temáticas	Instituto Nacional de Estadística (INE)	Reglamento (EU) 2016/679, Directiva (EU) 2019/1024
Modelos Digitales de Elevaciones	Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG)	Directiva 2007/2/CE (INSPIRE)
Zonas Climáticas	Código Técnico de la Edificación – Ahorro de Energía (CTE DB-HE)	Directiva (EU) 2018/844

A partir de la información proporcionada por estas fuentes, se pueden generar diferentes análisis de datos para obtener indicadores de progreso. Dado que la información, en general, está a nivel de edificio, es posible agruparla en diferentes escalas y clasificaciones según el análisis deseado.

3.3.3.1. Catastro INSPIRE

La directiva INSPIRE contempla la edificación como uno de los 21 conjuntos de datos espaciales que deben ofrecerse de forma conjunta e interoperable por los países miembros con el objetivo de mejorar las políticas y aplicaciones que

pueden incidir en el medio ambiente [20]. La directiva establece que cada país debe realizarlo en función de su propia infraestructura, en el caso de España, es la Dirección General del Catastro la entidad encargada de gestionarlo.

El catastro INSPIRE español ofrece una gran cantidad de información en abierto sobre el parque edificado nacional, organizada en la estructura de datos que define la normativa INSPIRE [108]. Esta estructura se encuentra en constante actualización por el grupo de trabajo denominado *INSPIRE Maintenance and Implementation* y su modificación se puede consultar en [109].

La información ofrecida está basada en 3 categorías [110]:

- Parcela catastral
- Direcciones
- Edificios

Para el desarrollo de la tesis se emplearán los datos de la categoría edificios, compuestos a su vez por las capas denominadas *Building*, *BuildingPart* y *OtherConstructions*, de las cuales la primera capa es la que contiene la información para generar los modelos.

3.3.3.2. Centro Nacional de Información Geográfica

El Centro Nacional de Información Geográfica es un organismo español autónomo adscrito al Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, a través de la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional (IGN). De este organismo destaca la cantidad de información geográfica disponible en abierto que ofrece a través de su centro de descargas [111].

En cuanto a la información que ofrece para esta tesis son de particular relevancia los Modelos Digitales de Elevaciones, ficheros digitales de nubes de puntos 3D obtenidos con LiDAR, y la cartografía de los límites territoriales de las CCAA, provincias y municipios.

3.3.3.3. Bases de datos de Certificados de Eficiencia Energética

Los Certificados de Eficiencia Energética (CEE, en inglés *Energy Performance Certificates*, EPC) funcionan estableciendo un sistema de calificación diseñado para condensar la información sobre la eficiencia energética de los edificios, con el objetivo de ofrecer a los consumidores información sobre las propiedades que planean comprar o alquilar en países europeos [112]. Estos certificados se regulan a través de las EPBD, y su marco general está regulado por el Anexo I de la Directiva 2010/31/UE [48], modificado actualmente por el anexo V de la Directiva

(UE) 2024/1275 [63]. Los EM definen una metodología de simulación para evaluar el rendimiento energético de los edificios, de acuerdo con el marco general común descrito en el Anexo I de la mencionada directiva, aplicado a las características propias del país. En el caso de España, la metodología para simular y certificar la eficiencia energética de los edificios está definida originalmente en el Real Decreto 235/2013 [112], derogado por el Real Decreto 390/2021 [113], el Real Decreto 450/2022 [114] y un Procedimiento establecido por el Gobierno español [115], y se basa en la norma UNE-EN ISO 52000-1 [116]. Estos certificados son obligatorios desde 2013 cuando se construyan, compren o alquilen edificios o unidades de estos [112].

Cada país define su propia escala de acuerdo con una serie de criterios comunes, aunque en general funcionan clasificando los edificios entre A (Muy eficiente) y G (Muy ineficiente), por lo que las categorías E, F y G corresponden a los segmentos con peor rendimiento energético en cada país. En el caso de España, hay dos indicadores fundamentales [117]:

- Emisiones anuales de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ ($\text{kgCO}_2/\text{m}^2\text{año}$)⁵
- Consumo anual de energía primaria no renovable ($\text{kWh}/\text{m}^2\text{año}$)

Y una serie de indicadores complementarios:

- Demanda energética anual de calefacción ($\text{kWh}/\text{m}^2\text{año}$)
- Demanda energética anual de refrigeración ($\text{kWh}/\text{m}^2\text{año}$)
- Consumo anual de energía primaria no renovable desagregada por servicios ($\text{kWh}/\text{m}^2\text{año}$)
- Emisiones anuales de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ desagregada por servicios ($\text{kgCO}_2/\text{m}^2\text{año}$)
- Emisiones anuales de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ desagregada por consumo eléctrico y por otros combustibles ($\text{kgCO}_2/\text{m}^2\text{año}$)

Los criterios para establecer las clases energéticas están establecidos en [117], dependiendo fundamentalmente de si el uso es residencial privado o no. Dentro del uso residencial privado (vivienda), las clases dependen de si el edificio es nuevo o existente, de la zona climática, del tipo de vivienda (unifamiliar o plurifamiliar) y de si la ubicación del edificio es peninsular o extrapeninsular (Canarias, Baleares, Ceuta y Melilla).

Una vez realizado el CEE con un programa informático reconocido por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [118], debe

⁵ En el documento *Calificación de la eficiencia energética de los edificios* [117], se indica de forma explícita que las referencias a emisiones de CO_2 en los CEE se refieren a emisiones de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ en todos los casos, empleándose por tanto el término emisiones de GEI en este contexto al ser más preciso que el de emisiones de CO_2 .

registrarse obligatoriamente en la Comunidad Autónoma donde se encuentra el edificio [119].

Junto con el certificado energético el programa informático genera un archivo XML (*eXtensible Markup Language*) que contiene todos los datos de la certificación. Este archivo debe incluirse al registrar el CEE en la Comunidad Autónoma y es de donde se extrae la información que se publica en abierto. El sistema XML es un formato de texto utilizado para almacenar y transmitir datos de manera estructurada, con elementos delimitados por etiquetas. Es un estándar de intercambio de información muy empleado en bases de datos y para el intercambio de información entre sistemas. Este XML está definido en [120], documento que detalla cómo debe ser el archivo XML, determinando su estructura, datos y el tipo de dato que debe ser, codificación, etc., para que pueda ser legible por máquinas e interoperable con un esquema de funcionamiento claro y preciso.

Los CEE son una herramienta con un gran potencial, ya que su información debe ser accesible públicamente en cumplimiento de la Directiva de Eficiencia Energética de los Edificios (EPBD). Esto permite la recopilación y el análisis de la gran cantidad de datos que ofrecen, convirtiendo a esta información en la fuente de datos en abierto más grande sobre energía edificio a edificio.

Las directivas EPBD de 2010 y 2018 ya regulaban que las bases de datos de Certificados de Eficiencia Energética debían estar disponibles para la investigación previa solicitud. Sin embargo, el texto refundido de 2024 va más allá y especifica que las bases de datos de CEE deben estar disponibles públicamente, ser legibles por máquina, accesibles a través de una interfaz digital e interoperables con bases de datos administrativas como el catastro o el registro digital de edificios. Esto aumentará enormemente el potencial de los CEE para la investigación en toda Europa. Hasta ahora, los CEE ya se han utilizado en muchos estudios de investigación. Según Pasichnyi et al. [121], 79 artículos utilizaron CEE hasta 2018. Se han utilizado en estudios a escala regional, por ejemplo, [122], [123], [124], y a escala nacional, por ejemplo, [125], [126], [127]. Todos estos son de gran interés para el objetivo de la tesis; sin embargo, los resultados de estas investigaciones no abordan la generación de un modelo completo, sino que generalmente realizan un análisis de datos de los CEE, lo que limita los resultados que pueden alcanzar. Por ejemplo, al no incorporar la dimensión geoespacial, al no diferenciar por zona climática o región, ni estar diseñados para identificar áreas prioritarias para la rehabilitación y algunos, al no añadir otras fuentes de información, se ven limitados en la capacidad de análisis.

Para poder cumplir con el objetivo principal de los CEE, dar una clasificación comparativa del parque edificado, es necesario que los resultados no dependan del propio patrón de uso de los habitantes, ya que el perfil de usuario tiene unas

implicaciones energéticas muy relevantes, por esto los CEE emplean el mismo patrón para todas las viviendas, misma ocupación, temperaturas de consigna, etc.

Usar un mismo perfil de usuario ofrece ventajas y desventajas, por un lado, es necesario para evaluar en igualdad de uso los edificios lo que permite analizar las características energéticas del parque edificado. Sin embargo, esto también ofrece discrepancias en cuanto a los valores reales de consumo y emisiones de los edificios al no ser datos basados en monitorizaciones ya que los perfiles de uso pueden discrepar significativamente del uso que le dan los ocupantes de la vivienda.

En España, la recolección y publicación de estos certificados está delegada a las CCAA, las cuales son las responsables de gestionar sus propios registros de CEE y ofrecer los datos en abierto. En todos los casos, los datos están publicados bajo licencias Creative Commons by attribution 4.0 o similares como la licencia abierta de uso de información de Cataluña entre otras, sin restricciones de uso y citando la fuente de la información.

Respecto a los riesgos inherentes en la publicación de datos en abierto, hay que considerar que los CEE se diseñaron desde el inicio para ser públicos, por lo que su publicación no supone un riesgo significativo. Estos certificados contienen una parte pública, con información física y energética del edificio, y una parte privada, con datos del propietario y del certificador, que está protegida y no se publica.

Los datos energéticos publicados proceden de simulaciones y no de monitorizaciones reales, por lo que no revelan patrones de ocupación ni suponen riesgos de privacidad. El mayor peligro estaría en un ciberataque a la base de datos privada, lo cual depende de la seguridad de su diseño, no de los CEE en sí. Otro riesgo inherente es la necesidad de garantizar la integridad y veracidad de los datos, para ello la información se centraliza en administraciones públicas y los técnicos se registran mediante firma digital. Actualmente, los CEE cumplen con la legislación en materia de protección de datos personales, y los riesgos principales provienen de fallos en la seguridad de las bases de datos o ataques como el phishing.

El problema más relevante relativo a la publicación de los datos en abierto no es la publicación de los CEE, sino su infrautilización: la información suele ser poco accesible y comprensible para el público general. Esto genera el riesgo de que solo grandes actores (inversores, promotoras, grandes propietarios) aprovechen estos datos, dejando a pequeños propietarios, inquilinos o compradores sin los beneficios potenciales.

3.3.3.4. Catastro nacional

La información catastral en España se ofrece principalmente a través de la Dirección General del Catastro, publicando información sobre toda España a excepción de las Comunidades Autónomas de País Vasco y Navarra, que ofrecen sus datos catastrales a través de sus propios servicios a escala provincial [128].

Dentro de los diferentes servicios de difusión de datos catastrales que la Dirección General del Catastro ofrece, en esta investigación resultan particularmente útiles aquellos que permiten descargar grandes cantidades de datos a escala de provincia o superior, es decir, los servicios denominados 'Descarga masiva de datos y cartografía por provincia' [129]. Esta información se actualiza periódicamente cada 6 meses, la primera semana de febrero y de septiembre, y se ofrece en abierto y de forma gratuita. Se realiza de dos formas:

- Información catastral alfanumérica: Incluye la información no protegida de inmuebles y fincas situados en municipios bajo su competencia (todo el territorio nacional, a excepción del País Vasco y Navarra). Incluye una gran cantidad de información a múltiples escalas: Finca, Unidad Constructiva, Construcción, Inmueble, Reparto de elementos comunes y Cultivos [130]. La información se proporciona en formato CAT, un fichero de texto con líneas de 1.000 caracteres donde la posición de cada dato indica el campo al que pertenece [131].
- Cartografía vectorial: Incluye la información vectorial. Aporta una amplia cantidad de datos que van desde datos georreferenciados sobre las hojas catastrales, masas, construcciones y ejes de viarios entre otros. El formato de publicación es el Shapefile.

En particular en esta tesis se va a emplear la información catastral alfanumérica por la gran cantidad de información que aporta de los edificios, y para la información geográfica se ha optado por emplear la del catastro INSPIRE debido al mayor potencial que ofrece a futuro al estar regulado bajo una estructura común europea.

Esta información se publica bajo las condiciones indicadas en [132]. Respecto a la presente investigación, hay que destacar de las condiciones indicadas que se autoriza el uso público y comercial de la información catastral que haya sido sometida a procesos previos de transformación, dando lugar a una obra diferente. Se prohíbe explícitamente que la información catastral original descargada y no transformada sea difundida. La propiedad intelectual de la información catastral se pone a disposición de los usuarios tanto para uso propio como comercial, siendo siempre los derechos de propiedad intelectual de la Administración General del Estado del Reino de España. La propiedad intelectual de la obra resultante corresponde al autor de la obra, que deberá citar la fuente, el servicio utilizado y la fecha de acceso a los datos.

Estos aspectos serán relevantes de cara a la publicación y difusión de las herramientas que permitan generar el modelo, ya que la publicación del código no entra en conflicto en ningún caso con las condiciones planteadas, dado que la información del catastro debe descargarla el usuario de la Sede Electrónica del Catastro y el código la transforma, los modelos resultantes son una obra diferente, que no tiene como objetivo sustituir la publicación de los datos catastrales, sino que emplean la información ya tratada del catastro generando datos diferentes. Sin embargo, la publicación de los datos completos, incluyendo los de partida y los pasos intermedios sí podrían constituir una infracción de las condiciones, ya que contendrían los datos en bruto descargados, por lo que no se han publicado.

Los aspectos técnicos de los datos y su utilización se desarrollarán más adelante cuando se aborde el desarrollo técnico de los modelos en los capítulos 4 y 5.

3.3.3.5. Instituto Nacional de Estadística

El Instituto Nacional de Estadística (INE) [133] de España es el organismo encargado de la producción, análisis y difusión de las estadísticas oficiales en el país. Dependiente del Ministerio de Economía, tiene como misión proporcionar información estadística sobre diversos aspectos de la sociedad, la economía y el medio ambiente, apoyando la toma de decisiones políticas, la investigación y la planificación. Además, el INE coordina el Sistema Estadístico Nacional y organiza censos y encuestas a nivel nacional, como el Censo de Población y Vivienda que nos permite conocer la población de los municipios y su composición entre otros datos.

3.3.3.6. Observatorio de vulnerabilidad urbana: Atlas de la Edificación Residencial en España y Atlas de la Vulnerabilidad Urbana

El Observatorio de Vulnerabilidad Urbana [134] es un proyecto a largo plazo del Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana, que estudia las condiciones socioeconómicas y urbanísticas en España, permitiendo identificar áreas con mayores niveles de vulnerabilidad.

Dentro de este proyecto, el Atlas de la Edificación Residencial en España [135] ofrece una visión detallada sobre las características y distribución del parque residencial, mientras que el Atlas de la Vulnerabilidad Urbana [136] proporciona información sobre la población en situación de riesgo socioeconómico.

Ambos instrumentos proporcionan una gran cantidad de información desglosada en secciones censales, zonas geográficas de tamaño variable que abarcan desde unos pocos edificios hasta la escala de municipio y tienen un tamaño de entre 1.000 y 2.500 habitantes [137]. Esto proporciona una información en una escala muy reducida, lo que es de gran utilidad para las investigaciones. Las secciones censales son publicadas anualmente por el INE [138].

La información que aportan es muy variada y valiosa, aportando 30 indicadores a escala de sección censal sobre temas como las características de las viviendas, su uso y sus instalaciones, y 145 indicadores sobre vulnerabilidad urbana e información sociodemográfica respectivamente.

En los años 2001 y 2011 junto a esta información se publicó el ‘Análisis de las características de la edificación residencial en España’ [139], el cuál aporta un detallado análisis del parque edificado residencial, sin embargo, no ha vuelto a realizarse ninguna actualización de esta información.

Desafortunadamente, esta información se publicó en 2001 y 2011 en su práctica totalidad. En 2021 se actualizó por última vez la información, publicándose los datos relativos a 2018, pero siendo éstos únicamente sobre 11 indicadores de renta, una mínima fracción de la información que se ofrecía en los años precedentes. En el mismo comunicado indican que se complementaría la información con datos de 2021 cuando estuvieran disponibles. A fecha de febrero de 2025 no hay información acerca de futuras actualizaciones.

3.3.3.7. Legislación española

En cuanto a la legislación española, en particular en el contexto de esta investigación, va a ser de gran relevancia la normativa relativa a las características de la edificación y el ahorro de energía.

El Código Técnico de la Edificación (CTE) es el marco normativo que establece las exigencias básicas de calidad que deben cumplir los edificios, y en particular el Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE) contiene la normativa relativa a las exigencias de ahorro energético que deben cumplir los edificios.

Este documento será la principal fuente de información legislativa, ya que es el que en cada modificación ha establecido los valores que se considera que los edificios deben alcanzar en materia energética.

El CTE entre en vigor en el año 2006 a través del Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación [140].

El CTE en general y en particular el DB-HE se irán modificando con el tiempo, marcando estándares más exigentes en cuando al ahorro de energía. Estos cambios se producirán con las modificaciones de los años 2013, 2017 y 2019.

En estas nuevas versiones se establecen criterios más ambiciosos y con el avance de estas versiones, en el documento se definen los EECN, se desarrolla un conjunto de zonas climáticas que definen las necesidades de climatización del edificio según su ubicación, se establecen criterios de demanda y de consumo de energía, unos valores límite para el consumo de energía primaria total y para el Consumo de Energía Primaria No Renovable (CEPNR) y se incluye el uso de energías renovables entre otros.

Además, debe mencionarse la anterior normativa de la construcción, la Norma Básica de la Edificación NBE-CT-79, sobre Condiciones Térmicas en los edificios [141] de 1979 que estableció la necesidad de incorporar aislamiento térmico en la envolvente de los edificios.

3.3.4. Nuevos avances en tecnologías

En este apartado, se plantea el potencial que tienen algunas tecnologías emergentes para mejorar notablemente la disponibilidad y la calidad de los datos, ayudando así a los Estados Miembros a enfrentar el desafiante reto de obtener los indicadores de progreso y las fuentes de información de calidad. Se explora esto a través de una serie de tecnologías en particular que serán las aplicadas en los siguientes capítulos al caso de España, uno de los Estados Miembros de la UE.

3.3.4.1. El desarrollo de código para la automatización de procesos

El desarrollo de código para la automatización de procesos consiste en crear programas o secuencias de comandos (*scripts*) que permiten ejecutar tareas repetitivas de manera automática, sin necesidad de intervención humana. Esto se logra mediante el uso de algoritmos y herramientas de programación que optimizan la ejecución de procesos, haciéndolos más rápidos, eficientes y menos propensos a errores. Entre estas tareas se incluyen la recopilación de datos, la actualización de registros o la realización de cálculos complejos.

El desarrollo de código para automatizar procesos destaca por su capacidad para optimizar el análisis y la gestión de datos tanto alfanuméricos (tablas de datos) como geográficos. Sus principales beneficios incluyen la reducción de errores asociados a la introducción manual de información, la garantía de que todos los datos se tratan de manera uniforme y la posibilidad de llevar a cabo un examen exhaustivo y transparente de la metodología empleada, ya que permite evaluar con precisión cada paso del tratamiento de los datos.

Además, la automatización facilita la ejecución sistemática de tareas altamente repetitivas y el procesamiento eficiente de grandes volúmenes de información. Esto incrementa la escala y la complejidad de los análisis y modelos que se pueden desarrollar, permitiendo su actualización continua y la repetición de tareas de forma automática. Como resultado, es posible generar y actualizar modelos con facilidad, reduciendo significativamente el esfuerzo humano requerido y mejorando la capacidad de respuesta ante nuevos retos y necesidades.

3.3.4.2. Sistemas de Información Geográfica (GIS)

Los Sistemas de Información Geográfica (*Geographical Information System*, GIS) son una herramienta tecnológica que permite capturar, almacenar, analizar, gestionar y presentar datos geográficos y espaciales [142]. Su uso es fundamental para comprender patrones y relaciones en el territorio, facilitar la toma de decisiones informadas y resolver problemas vinculados a la localización. Al integrar datos de diferentes temáticas, los GIS permiten identificar patrones, relaciones e información valiosa en la dimensión espacial que, de otro modo, podrían pasar desapercibidos.

Estos sistemas pueden trabajar con cualquier tipo de datos geoespaciales, representados de múltiples formas, como coordenadas GPS, latitud y longitud, límites administrativos (provincias, municipios), parcelas catastrales, edificios o códigos postales. Además, tienen la capacidad de combinar información geográfica con datos alfanuméricos, como la población por municipio o el uso asignado a cada edificio. A través de este proceso, se generan capas de información superpuestas, que se integran para construir modelos complejos y detallados del territorio.

El uso de GIS tiene un enorme potencial para evaluar el progreso de la rehabilitación y la descarbonización del parque edificado, al integrar datos espaciales con información alfanumérica física y energética de los edificios. Estas herramientas posibilitan mapear los patrones de consumo y el comportamiento energético en distintas áreas geográficas, facilitando la identificación de zonas menos eficientes que requieren una rehabilitación energética. Su uso posibilita un análisis contextual preciso, incorporando factores como la orientación, la zona climática en que se encuentra y el entorno urbano, lo que favorece la toma de decisiones más informadas y específicas para mejorar la eficiencia energética de los edificios. Además, permite realizar análisis geoespaciales para potenciar los datos existentes. Análisis como la compacidad del edificio o la detección de medianeras para obtener la superficie expuesta al exterior del edificio logrando datos más precisos sobre el parque edificado.

3.3.4.3. Análisis de grandes volúmenes de datos

Debido a que los indicadores deben generarse a nivel nacional, es esencial contar con la capacidad de manejar grandes cantidades de datos. El análisis de grandes volúmenes de datos (*Big Data*) se presenta como una gran herramienta para calcular indicadores de progreso que permitan apoyar el desarrollo de estrategias y políticas públicas.

Si el Big Data se acompaña a su vez con información georreferenciada, permite incorporar las variables geoespaciales y realizar un desglose granular de la información. Al adaptar la escala del modelo según se necesite, se puede enfocar el área de estudio en diferentes escalas, como comunidades autónomas, provincias o municipios. Esto resulta crucial para realizar análisis a diferentes niveles, que apoyen estrategias no solo nacionales, sino también en todo el rango de escalas en que se interviene. Al generar la información edificio a edificio, el modelo puede alcanzar la pequeña escala, como es el barrio y el desglose de los edificios de un municipio, lo que posibilita el análisis a nivel local, el cual proporciona grandes ventajas, ya que facilita adaptar las políticas y los planes a las necesidades específicas de cada municipio.

Así, las decisiones basadas en datos locales contribuyen a la implementación de estrategias de rehabilitación más efectivas y precisas. Estas estrategias, basadas en un análisis geoespacial, permiten enfocar los esfuerzos en las áreas que más lo necesitan, optimizando recursos y asegurando que las políticas públicas tengan un mayor impacto. Además, facilita la creación de mapas y visualizaciones que contribuyen a la toma de decisiones basadas en evidencias y permiten un acercamiento de la información a las diferentes partes interesadas de manera más accesible.

Por otra parte, el análisis de grandes volúmenes de datos exige gestionar grandes volúmenes de información de forma eficiente, optimizando tanto los recursos humanos y computacionales como el tiempo de procesamiento. Para ello, es necesario considerar una serie de aspectos clave, entre los que destacan:

a) Tratamiento de grandes volúmenes de datos

El manejo de grandes conjuntos de datos requiere emplear técnicas y formatos específicos que permitan una gestión eficiente tanto de memoria RAM como de espacio en disco.

En cuanto a estos aspectos encontramos:

- El uso de técnicas de 'Evaluación perezosa' (*Lazy Evaluation*), que admite cargar los datos solo cuando son necesarios, optimizando así el uso de memoria.

- El uso de librerías especializadas como Pandas [143] [144], Polars y Dask, que pueden trabajar con grandes cantidades de datos de forma eficiente. Pandas es la librería en Python más usada para el manejo de datos, con una gran cantidad de herramientas para su manipulación y análisis. Polars es una alternativa más eficiente que Pandas en términos de uso de memoria y velocidad para grandes conjuntos de datos, ya que trabaja con procesamiento paralelo y en columnas. Dask, por su parte, permite el procesamiento de datos en paralelo y maneja conjuntos de datos que no caben en memoria.
- La optimización de las variables de los datos. Reducir el tamaño de las variables, de forma que tengan la precisión necesaria, pero no ocupen más de lo necesario. Por ejemplo, *float64* ocupa 8 bytes de memoria, mientras que un *float32* solo necesita 4 bytes, lo que implica una reducción significativa en el consumo de memoria.
- Asimismo, segmentar el trabajo en diferentes conjuntos (conocidos como *chunks*), facilita el procesamiento de grandes volúmenes de datos, ya que trabaja en secciones más pequeñas del conjunto de datos para no comprometer la capacidad de memoria del sistema.

b) Manejo de datos georreferenciados

La incorporación de la dimensión espacial al Big Data supone un reto adicional, ya que implica trabajar con datos que contienen información geoespacial. Para abordar este desafío, existen librerías especializadas que permiten manipular datos espaciales de manera eficiente, como GeoPandas y GeoPolars.

Estas herramientas amplían las funcionalidades de librerías como Pandas y Polars, integrando soporte para geometrías y sistemas de coordenadas de referencia (*coordinate reference system*, CRS). Esto facilita la realización de operaciones geoespaciales como intersecciones, uniones espaciales, reproyecciones o cálculos de distancias o tamaños.

Además, técnicas como la indexación espacial mejoran de forma notable el rendimiento en la búsqueda y análisis de datos geográficos. La creación de estos índices permite acelerar procesos como la detección de elementos dentro de un área determinada o la identificación de relaciones espaciales entre entidades, lo que reduce el tiempo de procesamiento y aumenta la precisión de los análisis en conjuntos de datos de gran tamaño.

c) Formatos de almacenamiento eficientes

El uso de formatos de almacenamiento optimizados para manejar grandes volúmenes de datos es crucial para reducir el consumo de espacio en disco y memoria, así como para mejorar la velocidad de lectura y escritura de los datos. Formatos como Parquet y GeoParquet son especialmente útiles en este sentido,

ya que permiten almacenar los datos en columnas, lo que facilita el acceso rápido a los mismos y reduce el tamaño del archivo en comparación con formatos clásicos como CSV o Shapefile.

Parquet es un formato binario capaz de una compresión y almacenamiento eficiente de datos tabulares. Al almacenar los datos por columnas, se puede acceder rápidamente a aquellas columnas que se necesitan en un momento determinado, en lugar de cargar todo el archivo en memoria. Esto es especialmente útil a la hora de tratar grandes cantidades de datos, donde toda la información no es necesaria en cada paso y puede llegar a desbordar la memoria.

Por otro lado, el formato GeoParquet está diseñado específicamente para el almacenamiento de gran cantidad de datos geográficos, lo que lo convierte en una alternativa más eficiente que el formato Shapefile. GeoParquet permite manejar grandes volúmenes de datos geoespaciales de manera eficiente y, al ser compatible con muchas herramientas de análisis geoespacial como QGIS, facilita la interoperabilidad entre diferentes plataformas.

3.3.4.4. Machine Learning

El aprendizaje automático (Machine Learning, ML) ofrece un enfoque altamente innovador para evaluar la eficiencia energética de los edificios y monitorizar el progreso de su rehabilitación. A través del análisis predictivo, los algoritmos de aprendizaje automático pueden identificar patrones complejos en el consumo energético, predecir futuros comportamientos de uso y recomendar mejoras personalizadas.

Estas tecnologías permiten una evaluación dinámica y continua, adaptándose a cambios en las condiciones de operación o en la ocupación del edificio, lo que optimiza el proceso de rehabilitación y maximiza los ahorros energéticos a lo largo del tiempo.

En la actualidad, existen muchos algoritmos de aprendizaje automático empleados en la literatura científica para analizar el comportamiento energético de los edificios.

Por ejemplo, Ali et al. [145] desarrollan un estudio comparativo de diferentes técnicas de ML de clusterización, K-Mean, Hierarchical, Density-based y K-Medoids, para segmentar el parque edificado en arquetipos en partir de su comportamiento energético. Ali et al. [146] y Li et al. [147] emplean ML para predecir el consumo de energía, probando diferentes algoritmos de ML para determinar el enfoque más preciso. Garbasevski [148] usa ML para predecir la edad de los edificios utilizando técnicas de random forest e incorporando

variables geoespaciales para enriquecer el modelo, que se aplica en ocho ciudades de Alemania.

3.3.5. Potencial de los Urban Building Energy Models (UBEM)

Los Modelos Urbanos de Energía en Edificios (*Urban Building Energy Models*, UBEM) representan una herramienta de gran valor para evaluar el comportamiento energético de los edificios a nivel urbano, integrando datos de múltiples edificaciones para simular el comportamiento energético del área de estudio.

Históricamente, los *Building Energy Models* (BEM) han sido herramientas claves para conocer el comportamiento energético de un edificio, y para proponer mejoras a su eficiencia energética. Estos modelos se desarrollan comúnmente a escala de edificio y emplean información muy detallada sobre los materiales y las transmitancias de cada componente del edificio, sus patrones de ocupación y sus instalaciones. Sin embargo, al afrontar el reto de generar estos modelos a escala de barrio y superior, el desarrollo de estos modelos de gran precisión puede no ser rentable en tiempo y coste [149], para ello se utilizan los llamados UBEM. Estos modelos emplean simplificaciones en la física que determina el comportamiento energético de los edificios para simular grandes grupos de ellos. Para poder abarcar los grandes conjuntos de edificios se emplean diferentes aproximaciones para crear estos modelos en tiempo y costes razonables [23].

Los UBEM son instrumentos útiles para conocer el comportamiento energético de conjuntos de edificios a nivel de barrio, ciudad o país [100]. Estos modelos permiten analizar de forma eficiente el comportamiento energético y el impacto de diversas intervenciones de rehabilitación en todo un conjunto de edificios [150], de nuevos barrios [151], identificar áreas urbanas ineficientes [149], o combinarse con otras fuentes de información para impulsar la instalación de energías renovables en los edificios [152].

Generalmente, un modelo UBEM abarca una escala espacial que va del grupo de edificios, al distrito, barrio o ciudad [24]. Sin embargo, esta escala podría ampliarse mientras lo permita la disponibilidad de datos.

En esta tesis se propone la escala nacional para desarrollar un modelo edificio a edificio que permita analizar el parque de edificios que forma el país y calcular los indicadores de progreso obtenibles a través de la información en abierto. Un modelo de escala país tiene el potencial de responder a una amplia variedad de indicadores de progreso, requeridos en el texto refundido de la EPBD de 2024, y de generar información valiosa para desarrollar estrategias de descarbonización a amplia escala, que permitan la decisión basada en datos de nuevas políticas de descarbonización.

3.3.5.1. Oportunidades que ofrecen

Los modelos UBEM poseen una gran ventaja para afrontar el reto que supone el obtener, tratar y analizar toda la información requerida para poder estudiar el comportamiento energético de los edificios y el progreso de la rehabilitación y la descarbonización. Estos modelos aprovechan el potencial que ofrece la georreferenciación de los datos y la automatización de los procesos y son muy aptos para la aplicación de nuevas tecnologías como el manejo de Big Data o el uso de IA para potenciarlos.

Estos modelos ofrecen un gran potencial de análisis, ya que permiten combinar múltiples fuentes de información en abierto en un único modelo georreferenciado edificio a edificio, que contiene una enorme cantidad de información sobre una gran cantidad de edificaciones, permitiendo realizar múltiples análisis acerca del parque construido y cómo, con base en los nuevos datos en abierto, va progresando el parque edificado.

Técnicas como la georreferenciación y la combinación de diferentes fuentes de datos en abierto en un único modelo son herramientas claves para mejorar el valor de la información disponible. Añaden el contexto espacial e interconectan conjuntos de datos dispares, transformándolos en una fuente de información coherente e interrelacionada.

3.3.5.2. Estado del arte de los UBEM

Los UBEM son herramientas útiles para conocer el consumo energético de áreas urbanas o ciudades, con el fin de promover el desarrollo urbano sostenible y su mejora [153]. Típicamente, un UBEM abarca una escala espacial que va desde un conjunto de edificios hasta un distrito, barrio o ciudad [24]. Sin embargo, esta escala puede ampliarse en función de que la disponibilidad de datos lo permita.

Los modelos UBEM se clasifican generalmente en dos formas, según su finalidad [151] y según cómo son elaborados [154] [155].

Los UBEM según su finalidad se clasifican en cuatro categorías [151]:

- a) UBEM para planificación urbana y diseño de nuevos barrios.
- b) UBEM para estrategias de reducción de carbono a nivel de parque edificado.
- c) UBEM para recomendaciones a nivel de edificio.
- d) UBEM para la integración de edificios con la red eléctrica (*Buildings-to-Grid*, B2G).

Cada categoría persigue unos objetivos diferentes y, por tanto, requiere de unos datos para generarse, obteniendo unos resultados y precisiones que variarán según la categoría.

Los UBEM dedicados al diseño de nuevos barrios, donde se plantean posibles desarrollos urbanos, son los menos precisos y más variables, debido al grado de incertidumbre que es muy alto al no ser edificios todavía construidos.

Los UBEM destinados al diseño de estrategias de reducción de carbono a nivel de parque edificado, donde se toman datos existentes de grandes cantidades de edificios para realizar análisis a grandes escalas, obtienen una precisión mayor que los anteriores al ser ya edificaciones construidas, pero sin alcanzar un conocimiento totalmente preciso de cada edificio singular, ya que no se busca dar recomendaciones a escala individual. El estudio planteado en esta tesis, y que se desarrollará en los siguientes capítulos, entra en esta categoría.

Los UBEM para recomendaciones a nivel de edificio son modelos que abarcan escalas reducidas, pero con un nivel de conocimiento de cada edificio individual mucho mayor. Estos modelos plantean la intervención en las áreas urbanas mediante la identificación precisa de los edificios cuya eficiencia debe mejorarse, así como qué aspectos específicos deben corregirse. Son modelos precisos a escala de edificio individual que requieren de gran cantidad de información para generarse, generalmente requiriendo de la supervisión edificio a edificio para recolectar la información necesaria.

Los UBEM para la integración de edificios con la red eléctrica son modelos destinados a crear redes eléctricas, comunidades energéticas, etc. Dentro del barrio, requieren de un preciso modelado del comportamiento energético para poder diseñar una red eléctrica adecuadamente dimensionada. Son los modelos más precisos, pero que más información y nivel de detalle requieren.

En cuanto a la metodología empleada en la creación del modelo, todos ellos se clasifican en dos tipos principales con diferentes subtipos [154] [155]:

- *Top-down models*: utilizan principalmente variables macroeconómicas, como series temporales históricas, para determinar las predicciones energéticas, basándose principalmente en las interrelaciones entre el sector energético y la economía en general. No es necesario contar con información detallada sobre los edificios.
- *Bottom-up models*: representan el consumo energético utilizando información detallada sobre los usos finales de la energía. Estos se dividen en dos subtipos:
 - *Statistical bottom-up models*: se basan en datos estadísticos que caracterizan el uso energético de edificios individuales.
 - *Physics-based bottom-up models*: emplean las características físicas de los edificios para simular su consumo energético. Estos requieren

modelización energética de los edificios y, a su vez, pueden subdividirse en [156]:

- *Simplified physics-based bottom-up models*: utilizan modelos simplificados para realizar estimaciones energéticas. En este método, la determinación del intercambio de calor entre el interior y el exterior implica considerar elementos como la eficiencia térmica de la envolvente, las condiciones del aire exterior y las variables de control interno [156].
- *Detailed physics-based bottom-up models*: emplean modelos detallados para estimaciones energéticas que caracterizan el comportamiento energético del edificio [156].

En los análisis a gran escala, las metodologías *Physics-based bottom-up* son de gran utilidad para identificar posibles mejoras de eficiencia en el parque edificado [157], ya que al usar datos de los edificios pueden ser utilizadas para analizar y evaluar futuros escenarios y tendencias [158]. Por esta razón, son un enfoque adecuado para establecer una trayectoria de rehabilitación que permita alcanzar los estándares mínimos de eficiencia energética establecidos por Europa. Los modelos *Simplified physics-based* carecen de la precisión de los modelos detallados. Sin embargo, uno de los desafíos a los que se enfrentan los UBEM *Detailed physics-based* es el alto consumo de los recursos computacionales y el tiempo necesario para generar estos modelos [159].

Dentro de la categoría de *Detailed physics-based* existen diferentes subcategorías en función de cómo se realizan:

- Aproximación por edificios individuales (*Individual building approach*): Se realiza un modelo de cada edificio representando sus características concretas.
- Aproximación por edificios representativos (*Representative building approach*): Representan conjuntos de edificios individuales mediante edificios típicos que reflejan sus características, los arquetipos.

Cada subcategoría presenta diferentes ventajas e inconvenientes. La aproximación por edificios individuales es la más precisa, ya que modela de forma concreta cada edificio, sin embargo, es la más limitada puesto que requiere un alto conocimiento de cada edificio, lo que generalmente implica un alto consumo de tiempo y recursos humanos en inspeccionar y documentar apropiadamente cada edificio. La aproximación por edificios representativos se basa en la modelización de arquetipos de edificios, es decir, representaciones de un grupo de edificios individuales mediante el uso de un edificio típico. El uso de arquetipos es una estrategia para simplificar la modelización de grandes áreas geográficas. Mediante estos se sustituye la información ausente edificio a edificio por un valor aproximado del arquetipo que le representa [158]. El uso de este

enfoque de edificios representativos reduce el trabajo de modelización y el cálculo computacional, y produce resultados comparables en términos de ahorro energético agregado promedio, aunque la variación real se subestima debido a la ausencia de diversidad en las características de los edificios [160].

Una tercera vía, propuesta en esta tesis, consiste en generar los modelos empleando los CEE. Esta aproximación, denominada en inglés *Energy Performance Certificate-based* (EPC-based), posee la ventaja frente a los UBEM por arquetipos de tratar con la diversidad de las características de los edificios, al ser certificados realizados por un técnico sobre ese específico edificio, y frente a los UBEM por edificios individuales de no requerir el trabajo exhaustivo edificio a edificio, ya que se parte del trabajo hecho por el técnico que realizó el certificado. Sin embargo, poseen otras desventajas debido a los propios CEE, como es la falta de certificados en un amplio porcentaje del parque edificado, la existencia de errores e imprecisiones en los CEE y los problemas asociados a la recopilación, la homogeneización y el tratamiento de los datos [100].

La metodología híbrida (*Hybrid approach*) ha surgido como una forma adicional a las anteriores de crear los UBEM, una aproximación novedosa que complementa las anteriores. Un modelo híbrido, según Bass [33], Oraiopoulos [161] y Li [147], combina modelos energéticos con técnicas de aprendizaje automático para generar modelos que no solo incluyan información sobre los edificios con datos existentes, sino que también predigan el comportamiento de edificios sin datos. Esta metodología híbrida ofrece un gran potencial para desarrollar UBEM destinados a estrategias de reducción de carbono a nivel de parque, ya que permite expandir el conocimiento a partir de los datos recopilados a otros edificios para los cuales no se dispone de información sobre el rendimiento energético.

La figura 8 resume las posibles estrategias metodológicas para generar un UBEM según se desarrolla en [100], con la adición de la aproximación híbrida.

3.3. Oportunidades en el Open Big Data y los modelos UBEM para responder al reto del desarrollo de los indicadores de progreso

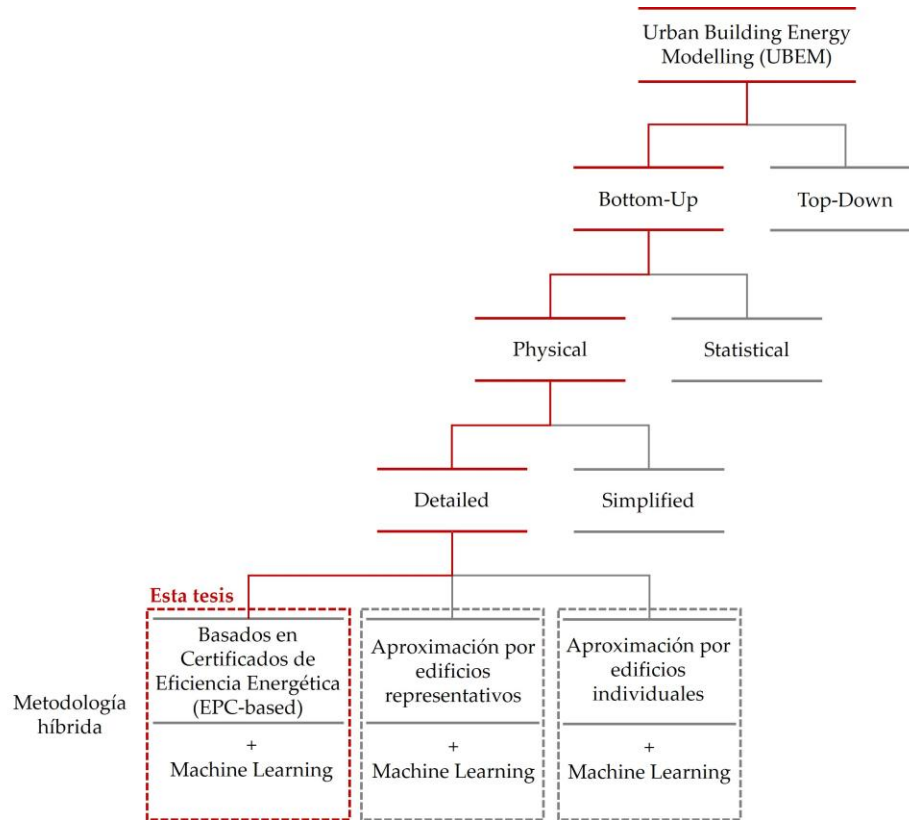


Figura 8. Esquema de las diferentes metodologías para generar modelos UBEM. El enfoque desarrollado en esta tesis se indica en rojo. Elaboración propia, adaptación de la figura publicada en [162].

Como se puede observar en la figura 8, existen tres formas principales de generar UBEM *Detailed physics-based bottom-up models*: edificios individuales, arquetipos y basados en CEE. Para realizar modelos a gran escala solo los enfoques basados en arquetipos y CEE son viables, ya que no es factible modelar cada edificio de forma individual. Los UBEM basados en arquetipos son ampliamente utilizados para estrategias de reducción de carbono a nivel de parque en diferentes escalas. Por ejemplo, García-López et al. [163] desarrollan un modelo residencial de un distrito en Jaén (España), creando los arquetipos basados en las tipologías españolas. Groppi et al. [152] generan un UBEM a escala de vecindario basado en arquetipos combinados con el potencial fotovoltaico en tejados. Heindertaler et al. [164] crean un bottom-up UBEM utilizando arquetipos basados en TABULA para determinar los perfiles horarios de consumo de energía de calefacción en edificios residenciales a escala de vecindario y comparar los resultados de la simulación con mediciones reales de dos sistemas de *district heating*. Blázquez et al. [165] establecen un protocolo para estudiar el comportamiento energético de tipologías de edificios específicas en países mediterráneos, utilizando Córdoba (España) como caso de estudio. García-Pérez et al. [150] combinan Sistemas de Información Geográfica (GIS) y el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para calcular diferentes estrategias de rehabilitación en

Barcelona, utilizando datos catastrales y estadísticos. Sokol et al. [166] generan UBEM basados en estadísticas bayesianas en la región de Sicilia.

Los UBEM basados en arquetipos enfrentan desafíos relacionados con la generación precisa y representativa de arquetipos. Como destaca Eggimann et al. [167], existen diferentes errores de características espaciotemporales que ocurren al agrupar edificios. De Jaeger et al. [168] estudian la importancia de una adecuada agrupación de edificios al determinar los arquetipos y su importancia para generar modelos confiables a escala de distrito, así como las principales variables utilizadas en la literatura, destacando que el análisis de las características de los edificios, como la geometría, el año de construcción o el número de pisos, es una alternativa viable en las simulaciones energéticas urbanas.

Actualmente, muchos arquetipos están basados en la experiencia (*experience-based archetypes*) [168][169], es decir, están desarrollados en función de la experiencia de los investigadores o resultados previos, en lugar de provenir de información detallada y específica del caso de estudio, ya que generalmente no hay suficientes datos detallados a escala de distrito, ciudad o territorio para generar estos arquetipos. Estos modelos permiten modelar con menos información y requisitos computacionales, pero corren el riesgo de contener errores o generalizaciones incorrectas que no representen adecuadamente los edificios en el caso de estudio. Como señala Alguacil et al. [170], el uso de arquetipos basados en estadísticas es complejo en España, ya que proyectos como el *Typology Approach for Building Stock Energy Assessment* (TABULA) no proporcionan suficiente información para generar un panorama energético adecuado para el país. Un punto importante, según enfatiza Fabbri et al. [171], es que el rendimiento energético depende no solo del periodo de construcción, sino también de las soluciones arquitectónicas, morfológicas y tecnológicas que caracterizan cada edificio. Este es un aspecto crítico, cuya creación presenta desafíos que requieren una comprensión detallada de cada edificio, algo que la agrupación de arquetipos a menudo no puede lograr.

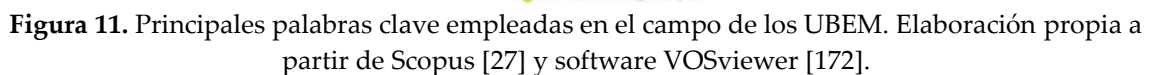
El otro enfoque para simulaciones a gran escala es la generación de un UBEM basado en CEE. El CEE es un sistema de clasificación creado en Europa para resumir la eficiencia energética de los edificios, con el objetivo de proporcionar a los consumidores información sobre las propiedades que planean comprar o alquilar en países europeos [46]. Este esquema está regido por la Directiva 2010/31/EU e implica la generación de un modelo energético para cada edificio, oficina o unidad habitacional que se venda o alquile en Europa [48]. Los UBEM basados en CEE ofrecen una alternativa viable al problema de precisión de los UBEM basados en arquetipos, ya que el uso de CEE creados específicamente para cada edificio permite obtener datos más concretos de manera individualizada. Sin embargo, el problema del uso de CEE para simulaciones a gran escala es que

solo un porcentaje reducido de edificios cuenta con tales certificados. Por ejemplo, en España solo el 12,9% de los edificios existentes tiene CEE a fecha de 2023 [100].

Con el avance de nuevas tecnologías, como la Inteligencia Artificial (*Artificial intelligence*, AI), ha surgido recientemente la metodología híbrida, que combina modelos *bottom-up* con modelos estadísticos o de aprendizaje automático (*Machine Learning*, ML) [33]. A través de ML, una rama de la IA que permite a las máquinas aprender a partir de datos sin necesidad de ser programadas explícitamente para cada tarea, es posible analizar patrones de comportamiento energético que se caracterizan por las variables del edificio. Este enfoque mejora el potencial y la representatividad de los modelos, abordando un desafío importante: el tratamiento, el análisis y la comunicación de grandes volúmenes de datos sobre eficiencia energética de edificios [23]. Este potencial puede ser muy valioso para la creación de modelos a gran escala, ya que el factor más limitante es la falta de datos y las complejidades asociadas a la interoperabilidad de diversos conjuntos de datos [24].

En la literatura científica, los modelos UBEM son un campo relativamente reciente, pero con un intenso desarrollo científico. Comenzó en 2015 con cuatro comunicaciones en congresos y en 2016 con los dos primeros artículos sobre UBEM. Según el buscador de documentos de Scopus [27] hay actualmente, 405 publicaciones de 978 autores a fecha de septiembre de 2024 que contienen las palabras *Urban Building Energy Model* o *Urban Building Energy Modelling*.

Como se puede apreciar en la figura 9, el número de publicaciones aumenta desde 2017 y presenta cada vez un incremento mayor hasta 2023 con el máximo de publicaciones y en septiembre de 2024 el número ya supera las publicaciones de 2022 ampliamente. En la figura 10 se muestran las publicaciones más citadas en Scopus, destacando la de Reinhart et al. [23] que sienta varias de las bases de este campo.



La generación de modelos energéticos de edificios a escala nacional es un reto todavía pendiente hoy en día, no habiendo sido apenas abordado en la literatura científica. Esto generalmente es debido a la serie de retos que implica generar un modelo como es un UBEM a escala nacional, destacando:

- 103

- Falta de datos: para poder elaborar estos modelos a gran escala se requiere de gran cantidad de información, muchas veces no disponible o incompleta.
- Coste en tiempo y recursos: generar grandes modelos requiere un muy alto consumo de recursos tanto humanos como de capacidad del ordenador de generar los cálculos muy altos. En especial, la simulación energética requiere de un elevado consumo de recursos y tiempo. Por ello se emplean generalmente supercomputadoras para realizar los cálculos de estos modelos.

En la literatura científica se encuentran muy pocos ejemplos que hayan realizado modelos a escala nacional y, o bien emplean supercomputadoras para llevar a cabo los modelos, o generan valores estadísticos a escala nacional pero no modelos edificio a edificio.

Esta tesis realiza una propuesta de metodología para generar un modelo a escala nacional, que se apoya en los avances en nuevas tecnologías y en los datos en abierto disponibles para obtener la información geográfica, las características físicas de los edificios y las características energéticas. De forma que se pueda generar un UBEM a escala nacional, abordando las complejidades que implican los retos antes descritos.

De entre todos los que se plantean, la dificultad de determinar con precisión las características energéticas de todo el parque residencial de un país del tamaño de España resulta especialmente complejo. Generalmente se opta por el enfoque de arquetipos. Sin embargo, abarcando la escala nacional y la multiplicidad de casuísticas tanto climáticas como de variedad constructiva de España, resulta especialmente complejo poder considerarlos representativos del parque edificado. Otra aproximación es tomar datos edificio a edificio, lo cual resulta completamente inviable. Sin embargo, para paliar esta problemática existen las bases de datos en abierto de los Certificados de Eficiencia Energética. Los CEE permiten conocer las características energéticas edificio a edificio de aquellos que disponen de al menos un certificado. Si bien el uso de estos certificados implica una serie de problemáticas diversas que se abordarán en su correspondiente apartado, estos certificados permiten paliar dos de los retos planteados para generar estos modelos:

- Mitigan la falta de datos sobre la información energética de los edificios, aunque no de todo el parque edificado. Actualmente son la única fuente de datos energéticos en abierto a gran escala que ofrece información edificio a edificio.
- Reducen enormemente el coste en tiempo y recursos. Al haber realizado la simulación el técnico certificador y aportar la información energética directamente, se evita tener que realizar simulaciones energéticas con el UBEM. Al no tener que simular energéticamente los edificios se

consigue que el tiempo y la exigencia de recursos informáticos se vean drásticamente reducidos.

Por tanto, se considera que el desarrollo de un modelo UBEM empleando los datos en abierto como son los CEE es viable y permitirá ampliar el conocimiento que se tiene sobre los edificios, logrando obtener indicadores de progreso, diagnosticar el rendimiento energético de su parque edificado y ofrecer datos para apoyar el desarrollo de políticas basadas en datos y la elaboración de estrategias de rehabilitación para cumplir con los objetivos de neutralidad climática.

**Modelo UBEM nacional basado en
Certificados de Eficiencia Energética
(CEE)**

El capítulo 4 es una versión extendida y actualizada de las siguientes publicaciones:

- Beltrán Velamazán, C.; Monzón Chavarrias, M.; López Mesa, B. A New Approach for National-Scale Building Energy Models Based on Energy Performance Certificates in European Countries: The Case of Spain. *Heliyon* **2024**, 10, e25473. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25473>.
- Beltrán Velamazán, C.; Gómez Gil, M.; Monzón Chavarrias, M.; Espinosa Fernández, A.; López Mesa, B. Harnessing Open European Data for a Data-Driven Approach to Enhancing Decarbonization Measurement in the Built Environment. *Environmental and Climate Technologies* **2024**, 28, 776–793. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2024-0060>.

Y de capítulos del libro:

- Beltrán Velamazán, C.; Monzón Chavarrias, M.; López Mesa, B. Clasificación y caracterización del parque habitacional en zonas rurales. En *RuralREGEN Estudio sobre el estado de la rehabilitación energética de viviendas en el ámbito rural en España: diagnóstico, barreras y soluciones*; ECODES - Fundación Ecología y Desarrollo: Madrid, España, 2022; pp. 17–38. ISBN 978-84-18321-64-1. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.20360.80647>

El código en Python desarrollado para generar el modelo está disponible en GitHub:

- Beltrán Velamazán, C.; Monzón Chavarrias, M.; López Mesa, B. *GitHub - NBEM: Code to Generate National-Scale Building Energy Models Based on Energy Performance Certificates*. Disponible en: <https://github.com/CarlosBeltranVelamazan/NBEM>.

4. Modelo UBEM nacional basado en Certificados de Eficiencia Energética (CEE)

Los UBEM son instrumentos útiles para conocer el consumo energético de conjuntos de edificios a nivel urbano y nacional, proporcionando valiosa información para la evaluación de la eficiencia energética de los parques nacionales de edificios y la definición de estrategias de mejora.

En este capítulo se va a desarrollar la generación de un UBEM a escala nacional, aplicado al caso de España, utilizando CEE y otros datos abiertos de gran escala, con la ventaja de que puede generarse y actualizarse automáticamente en poco tiempo y con medios informáticos estándar. Este modelo permitirá combinar múltiples fuentes de datos para generar un modelo capaz de obtener una serie de indicadores de progreso.

El modelo permite mapear y analizar los edificios del país, integrando múltiples variables de diferente naturaleza, como geográficas (comunidad autónoma, municipio, tipo de municipio), físicas (superficie, número de plantas, fecha de construcción), relacionadas con el uso (uso principal del edificio y de cada una de sus unidades) y energéticas (zona climática, clase energética, consumo de energía, emisiones de GEI). En el caso de España, puede generarse y actualizarse automáticamente en menos de 6 horas con un ordenador estándar, y genera resultados que coinciden con los datos oficiales en más del 98% para cuatro indicadores. El modelo obtenido contiene información sobre 10.939.801 edificios en España, de los cuales 1.202.708 tienen CEE.

4.1. Objetivo: Creación de un modelo nacional empleando datos en abierto

En este punto se aborda el objetivo de crear una metodología para generar un modelo edificio a edificio con la información física y geoespacial de la totalidad de los edificios de España y con la información energética de todos los edificios que disponen de un CEE registrado en abierto.

En primer lugar, se debe considerar el objetivo para el que se crea el UBEM, que es la obtención de conocimiento sobre el parque edificado a escala nacional, integrando datos geográficos, físicos y energéticos, de forma que permita calcular un conjunto de indicadores de progreso. Este objetivo determina qué tipo de UBEM se debe desarrollar.

Además, es necesario considerar las características con las que desarrollar el modelo para que sea lo más útil posible:

- Automático. Debe poder ser generado de forma automática sin necesidad de intervenciones humanas. Para ello, deben diseñarse flujos de trabajo que integren de manera automática los datos provenientes de diversas fuentes, como catastros, datos geoespaciales y CEE.
- Actualizable. No debe ser una representación estática, sino que debe poder actualizarse con nuevos datos, por lo que el modelo debe ser automático y las fuentes de información proporcionar los datos de forma periódica y no ser informes o datos puntuales.
- Interoperable y usable. Debe ser compatible con otras bases de datos y sistemas de análisis para facilitar su uso y explotación por diversas partes interesadas (administraciones públicas, investigadores, empresas del sector energético, etc.). Para garantizar la interoperabilidad se emplea software libre, estándares abiertos y formatos de datos comúnmente aceptados. Todo el código generado para elaborar el modelo está disponible en abierto en GitHub [173] y puede ser creado y combinado con más fuentes de información para generar otros estudios.
- Escalable. Capaz de escalarse para adaptarse a diferentes niveles de análisis. Al generarse un UBEM edificio a edificio, aunque el objetivo inicial es a nivel nacional, también debe poder aplicarse a escalas más reducidas, como regiones, ciudades o barrios. Esto permite una evaluación más granular de las zonas que requieren intervenciones urgentes en cuanto a eficiencia energética y descarbonización.
- Aplicable a más casos de estudio. La necesidad de obtener conocimiento sobre el parque edificado e indicadores de progreso no es un reto únicamente de España, las fuentes de información del modelo están directamente basadas en Directivas Europeas o estrechamente vinculadas a ellas, de forma que, aunque el modelo se genere para el caso de España, este es al menos potencialmente desarrollable en la Unión Europea, empleando fuentes de información y datos análogos en los diferentes estados miembros, aunque dependerá del grado de implementación de los marcos de datos europeos que haya desarrollado el país miembro.
- Transparente y trazable. Para poder ser un modelo confiable, este debe contar con una metodología clara y definida, y un código abierto que permita evaluar el tratamiento de la información por un evaluador externo de forma que se asegure el correcto tratamiento de los datos. Esto es especialmente importante para garantizar la confianza en los resultados y para poder identificar y corregir posibles errores o inconsistencias en los modelos. Esto, junto con el objetivo de interoperabilidad y usabilidad, permitirá que los resultados obtenidos

puedan ser comparables y utilizables por otras entidades para estudios y proyectos.

- Eficiente en recursos y tiempo. Para que esta metodología sea eficaz y el modelo pueda ser usado debe poder crearse y analizarse en unos tiempos y recursos razonables. Esto implica que tanto la creación del modelo como su análisis deben poder llevarse a cabo utilizando un ordenador estándar, sin depender de supercomputadoras o clústers de altas prestaciones. Para lograr esta eficiencia, es fundamental optimizar el procesamiento de los datos y emplear técnicas que reduzcan la carga computacional. La metodología debe requerir una razonable demanda de recursos en un tiempo aceptable, garantizando que el proceso sea accesible para un amplio espectro de usuarios sin requerir inversiones adicionales en infraestructura tecnológica avanzada.

Estas características determinarán la metodología a diseñar para que el UBEM resultante no sea solo un modelo estático, sino una herramienta viva y adaptable que sirva para impulsar la eficiencia energética y la descarbonización a largo plazo.

4.2. Creación de un modelo UBEM a escala nacional basado en CEE

Como resultado del objetivo para el que se crea el UBEM se considera que el modelo propuesto se clasifica por su finalidad dentro de los tipos de modelos UBEM definidos en el apartado “3.3.5.2. Estado del arte de los UBEM” en la categoría “b) UBEM para estrategias de reducción de carbono a nivel de parque edificado”.

A partir de las características que debe tener la metodología con la que crear el modelo, se opta por la categoría de generar los modelos empleando los CEE, denominada *EPC-based detailed physical bottom-up UBEM*. De entre las fuentes de información que se emplean para construirlo, destaca el uso de los CEE, que permiten representar el comportamiento energético de cada edificio sin recurrir a arquetipos y sin tener que simular energéticamente los edificios, resultando en un enorme ahorro de los requisitos computacionales que requeriría.

La metodología resultante debe ofrecerse en abierto, usando software libre y gratuito bajo licencias como *Creative Commons license* (CC), MIT o *General Public License* (GNU GLP).

Para llevar a cabo el proceso de transformación, combinación y análisis de los datos, el software utilizado se especifica a continuación:

- Editor de código y lenguaje: Visual Studio Code y Python (versión 3.11.1).
- Herramientas de análisis de datos en Python: Pandas v.1.5.3, Numpy v.1.24.1, Polars v.0.16.13, Xlrd v.2.0.1, Elementpath v.4.0.1, Simpliedbf v.0.2.6.
- Herramientas de análisis geográfico: QGIS Desktop v.3.28.3, GeoPandas v.0.12.2. El uso de un enfoque basado en GeoPandas ha demostrado ser ventajoso al manejar grandes conjuntos de datos geográficos [174].

Tras la construcción del modelo, fue evaluado midiendo el tiempo de procesamiento para construirlo o actualizarlo, analizando la robustez mediante la verificación de la capacidad para obtener resultados correctos en los principales indicadores.

Para probar que el modelo es generable y analizable en un tiempo y recursos razonables se ha evaluado el tiempo de procesamiento para generar el UBEM basado en CEE a escala nacional aplicado a España. El modelo para todo el país de España se realizó utilizando un ordenador estándar (Procesador 11th Gen Intel(R) Core (TM) i5-11400F @ 2.60GHz 2.59 GHz; 16 GB de RAM; Windows 11, sistema operativo de 64 bits). El país utilizado como caso de estudio, España, tiene una extensión de 505.990 km² [175], 47.615.034 habitantes [176], y 10.939.801 edificios que ocupan una superficie total de 3.835,5 km².

4.3. Propuesta de metodología para generar un UBEM basado en CEE y otros datos en abierto

Para generar el modelo se ha diseñado una metodología que debe cumplir con las características anteriormente mencionadas.

En primer lugar, se ha establecido un esquema metodológico general, aplicable a todos los países europeos y basado en datos abiertos europeos (catastro INSPIRE, los datos abiertos de los CEE y el Modelo Digital del Terreno (DTM)), además de otros datos abiertos complementarios para enriquecer el análisis (figura 12). La construcción del modelo es automática y permite su actualización. La metodología se basa en dos bloques principales: Bloque A) Gestión de los datos; y Bloque B) Generación del modelo.

El Bloque A incluye para cada conjunto de datos, la descarga, la transformación de los datos y el filtrado de los errores y los valores anómalos.

El Bloque B incluye la agrupación de los datos, la creación de los modelos y la generación de análisis con los datos agrupados en clústeres, conjuntos de datos con las mismas características.

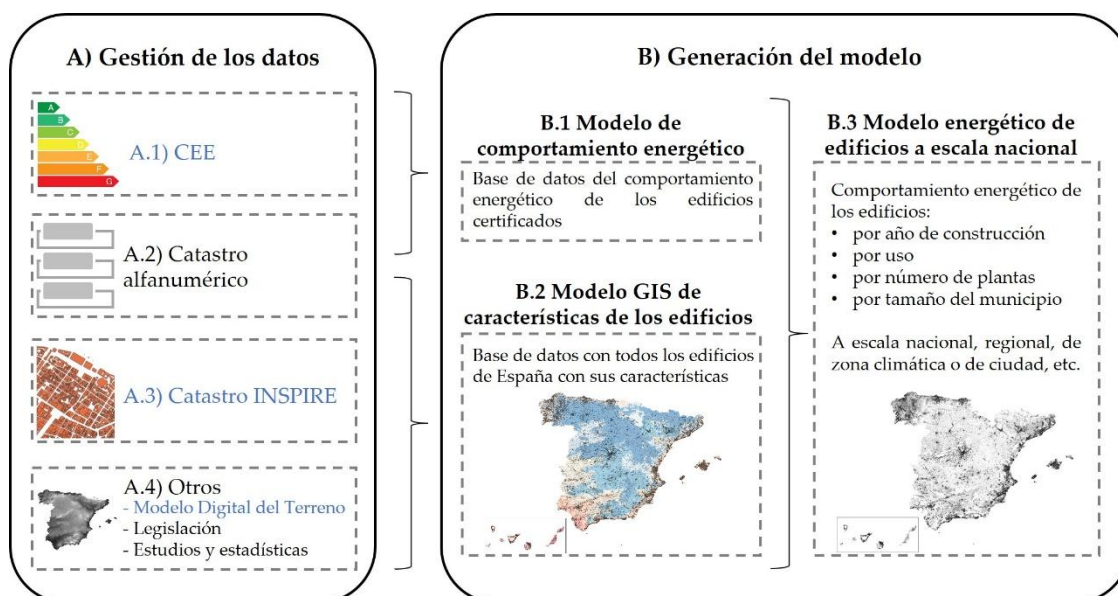


Figura 12. Descripción de la metodología general para elaborar el Modelo UBEM a escala nacional basado en CEE. Datos disponibles a nivel europeo en azul. Datos nacionales complementarios en negro. CEE: Certificado de Eficiencia Energética; INSPIRE: Infraestructura para la Información Espacial en Europa. Elaboración propia, adaptación de la figura publicada en [100].

La metodología para construir el UBEM para España ha sido desarrollada siguiendo el flujo de trabajo indicado en la figura 13, que desglosa y concreta la metodología general planteada en la figura 12. Esta se compone de los dos bloques con una serie de procesos:

- **Bloque A – Gestión de los datos.** Este paso consiste en la recolección de datos, preprocesamiento, detección de valores anómalos y transformación de datos provenientes de cuatro bases de datos (BBDD) diferentes:
 - **A.1 CEE.** Datos de los Certificados de Eficiencia Energética.
 - **A.2 Catastro alfanumérico.** Información sobre los edificios, los inmuebles y sus características. La información detallada sobre ambos conceptos se desarrollará en el subapartado 4.6.2. Tratamiento de datos alfanuméricos del catastro nacional.
 - **A.3 Catastro INSPIRE.** Datos geoespaciales estandarizados a nivel europeo.
 - **A.4 Otros.** Fuentes adicionales de datos abiertos complementarios.
- **Bloque B – Generación del modelo.** Aprovechando las sinergias de la combinación de datos de las diferentes fuentes de información, se generaron tres modelos:

- **B.1 Modelo de comportamiento energético.** Es una base de datos del rendimiento energético de todos los edificios y unidades de edificio (viviendas, locales, etc.) certificados en España. Este modelo contiene el consumo de energía primaria no renovable (CEPNR), las emisiones de GEI de cada edificio y los inmuebles del edificio con un CEE, su clase energética y la superficie certificada.
- **B.2 Modelo GIS del parque de edificios a nivel nacional.** Es un modelo GIS de todos los edificios de España con sus características generales. Está georreferenciado y contiene información detallada sobre el uso, la superficie construida por uso, el año de construcción, la zona climática, etc.
- **B.3 Modelo energético de edificios a escala nacional basado en CEE (*national-scale EPC-based UBEM*).** Es la combinación de ambos modelos. El resultado es un mapa GIS y una base de datos con información sobre todos los edificios y los inmuebles certificados, que incluyen tanto su comportamiento energético como sus características generales. La importancia de este modelo radica en que permite combinar los distintos datos de los edificios, determinar la representatividad de los edificios certificados a nivel nacional, agruparlos en clústeres y analizarlos.

La información adicional sobre los datos proporcionados y las bases de datos utilizadas para generar los modelos (CEE, catastro alfanumérico, catastro INSPIRE y otros) se pueden encontrar en la tabla C.1 del Anexo C. Además, en la tabla C.2 del Anexo C, se muestra la información que proporcionan los tres modelos.

4. Modelo UBEM nacional basado en Certificados de Eficiencia Energética (CEE)

4.3. Propuesta de metodología para generar un UBEM basado en CEE y otros datos en abierto

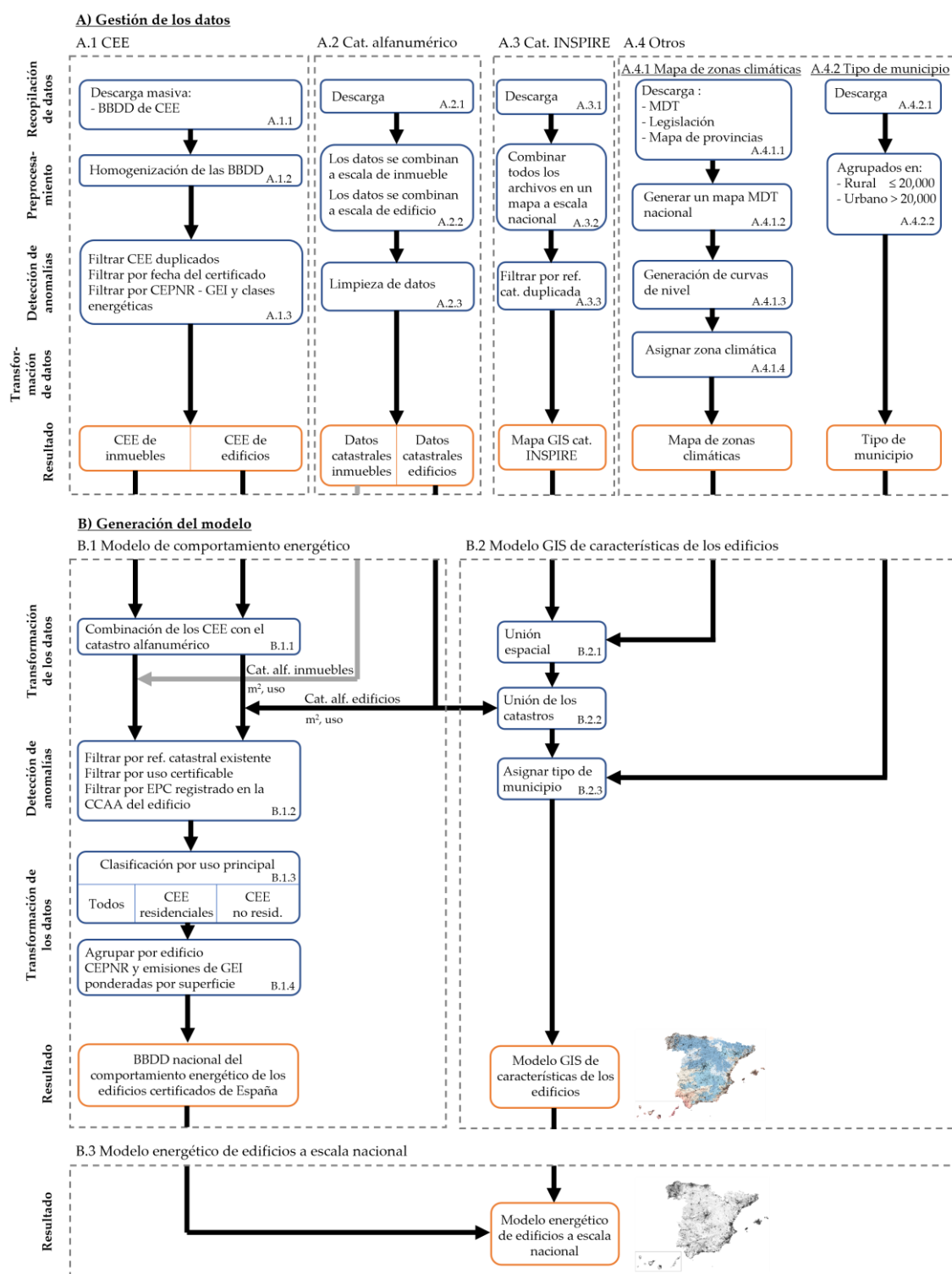


Figura 13. Flujo de trabajo de la metodología específica para elaborar el modelo UBEM a escala nacional basado en CEE aplicada al caso de España. En azul: Procesamiento de los datos, en naranja: resultados. CEE: Certificados de eficiencia energética, cat: catastro, alf: alfanumérico, BBDD: Bases de datos, CEPR: Consumo de energía primaria no renovable, GEI: Gases de efecto invernadero, MDT: Modelo digital del terreno. Elaboración propia, adaptación de la figura publicada en [100].

4.4. Datos empleados

En este apartado se detallan los datos empleados, de qué fuentes se obtienen y las características que deben tenerse en cuenta para su tratamiento e implementación en el modelo. El contexto general de estas fuentes se desarrolló en los subapartados 3.3.2. y 3.3.3. y en éste se van a detallar los aspectos específicos de su uso en el modelo.

España es un caso de estudio interesante para desarrollar el modelo UBEM a escala nacional, ya que tiene muchas competencias delegadas en las Comunidades Autónomas. Muchos de los datos no pueden obtenerse de una fuente nacional unificada, sino que deben obtenerse de cada una de las CCAA. Para el caso de España, los datos utilizados y las fuentes de información se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Datos empleados, fuentes de información, tipo de datos ofrecidos y su frecuencia de actualización. BBDD: bases de datos, MDT_200: modelo digital del terreno 2ª Cobertura con paso de malla de 200 metros. Elaboración propia, adaptación de la figura publicada en [177].

Datos	Fuentes	Tipo de dato	Frecuencia de actualización
BBDD de CEE	Diferentes para cada Comunidad Autónoma en España (tabla 7)	Alfanumérico	Varía según la Comunidad Autónoma
Edificios del catastro INSPIRE	Servicios de Cartografía Catastral INSPIRE [178]	Geográfico	Cada 6 meses
Edificios y bienes inmuebles del catastro	Oficina Electrónica del Catastro [131]	Alfanuméricos	Actualizados en el momento de la descarga
MDT_200	Dirección General del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de España [179]	Geográfico	Cada 5 años aproximadamente
Zonas climáticas	CTE DB HE "Ahorro de energía" [180]	Legislación española	Legislación vigente
Clases de eficiencia según consumo energético y emisiones	Calificación de la eficiencia energética de los edificios, Versión 1.1 / Noviembre 2015, Ministerio de Industria, Energía y Turismo [117]	Legislación española	Legislación vigente
Censo de población por municipio	Instituto Nacional de Estadística (INE) [181]	Estadísticas nacionales	Anualmente

4.4.1. Certificados de Eficiencia Energética

Los CEE son obligatorios en España para edificios e inmuebles existentes que se alquilan o venden desde junio de 2013 [112]. La certificación es válida por diez años, aunque el propietario puede actualizarla voluntariamente cuando una intervención en el edificio o inmueble cambie la clase energética obtenida. Para que un certificado energético en España sea oficial, su información debe estar obligatoriamente registrada en el organismo correspondiente de la Comunidad Autónoma del edificio [119], de forma que sea públicamente consultable. Al registrar un CEE, los técnicos deben incorporar el archivo XML generado por el software de certificación, que es el mismo para toda España.

Los Certificados de Eficiencia Energética se recogen actualmente a través de las diferentes CCAA de España y son ellas las que se encargan de ofrecer sus datos en abierto a través de diferentes instituciones propias. Con base en lo indicado en las EPBD, estos datos se ofrecen de dos formas:

- Mediante un buscador o visor que permite la consulta individual del certificado, un instrumento pensado para que el público general pueda acceder a consultar la información energética del edificio que se plantea comprar o alquilar.
- Mediante la consulta masiva de los datos, que permite la descarga y el análisis de los CEE en su conjunto, un instrumento destinado a investigadores, administración pública, etc., más enfocados al análisis energético del parque edificado. Opción de mayor interés en esta investigación.

Aunque los certificados energéticos que se presentan son iguales en todo el territorio nacional, no existe una regulación que determine qué datos y de qué forma deben proporcionarse en abierto. Por esta razón, la información publicada y la forma de presentarla son desiguales, lo que genera múltiples incompatibilidades y lagunas de información que se detallarán posteriormente.

4.4.1.1. Estructura de los datos

Los datos publicados se extraen de los archivos XML, que se generan al realizar el certificado de eficiencia energética y están estructurados según se indica en el documento [120]. La información que ofrecen las CCAA es la no protegida de los certificados, es decir, la relativa al propietario y al técnico certificador no se ofrece en abierto, el resto de los datos sí. Sin embargo, cada CA decide de forma independiente qué información y cómo la ofrece en abierto, variando fuertemente tanto el contenido como la forma de publicarla. Esto ha llevado a una implementación desigual en cada una y que algunas sigan sin la posibilidad de publicación, ofreciéndolos actualmente sólo bajo petición directa.

Como uno de los objetivos de esta metodología es que sea automática y actualizable, no se incluyen en el modelo los datos que sean recopilables si se solicitan vía correo electrónico o requieren de acuerdos específicos, todos deben ser obtenibles de forma directa.

En la tabla 7 se resume el estado actual de la disponibilidad de los CEE en abierto con las CCAA que los ofrecen y el acceso a la fuente de los datos.

Tabla 7. CCAA en España que ofrecen los CEE en registros de datos en abierto. En azul: registros posteriores a enero de 2024. Elaboración propia, adaptación de la figura publicada en [100].

Comunidad Autónoma	Disponibilidad de datos en abierto	Fuente de los datos
Andalucía	Si	[182]
Aragón	Si	[183]
Asturias	Si	[184]
Islas Baleares	Si	[185]
País Vasco	Si	[186]
Islas Canarias	Si	[187]
Cantabria	Si	[188]
Castilla y León	Si	[189]
Castilla La Mancha	Si	[190]
Cataluña	Si	[191]
Comunidad Valenciana	Si	[192]
Extremadura	Si	[193]
Galicia	Si	[194]
Rioja	Si	[195]
Madrid	Si	[196]
Murcia	No	-
Navarra	Si	[197]
Ceuta	No	-
Melilla	No	-

Resulta notable que a fecha de realización del estudio publicado en el artículo de Heliyon [100], enero de 2024, País Vasco, Extremadura y Madrid no ofrecían un acceso en abierto al registro de CEE, permaneciendo Murcia, Ceuta y Melilla actualmente sin ofrecer una vía en abierto para poder realizar la consulta masiva de los certificados, generando vacíos en la información energética a nivel nacional.

En cuanto a las CCAA que ofrecen los datos de los CEE en abierto, también han ido incorporando cambios en cuanto a la información que aportan. En

general, resulta notable la disparidad en los datos que se ofrecen de cada certificado y la forma de obtenerlos, aunque los XML de los certificados sean iguales. En la tabla 8 se muestra un resumen de los datos ofrecidos por cada CCAA en abierto.

Tabla 8. Información de los CEE proporcionada en abierto por cada CA. En blanco: no contiene esta información; Si: contiene esta información; P: contiene parcialmente esta información; en verde: información a fecha del estudio original; en azul: información aportada después de enero de 2024. Elaboración propia, adaptación de la figura publicada en [100].

Comunidad Autónoma	Datos para identificar y georreferenciar el CEE						Datos de la edificación			Datos de energía y emisiones					Otros datos		Total sobre 16
	Referencia catastral	Código postal	Coordenadas X, Y	Código del municipio	Municipio	Zona climática	Tipo de edificio	Fecha de construcción	Área	CEPNR	Clase por CEPNR	Emisiones de GEI	Clase por emisiones de GEI	Tipo de calefacción o refrigeración	Regulaciones, software, ...	Fecha de registro del certificado	
Andalucía	Si	Si			Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	14
Aragón	Si		Si		Si		Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si			Si	11
Asturias	Si	Si			Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	14
Islas Baleares	Si	Si			Si		Si	Si	Si	Si		Si	P		P	Si	11
Islas Canarias	Si				Si	Si				Si	Si	Si	Si	Si		Si	9
Cantabria	Si	Si		Si	Si		Si			Si	Si	Si	Si		Si	Si	11
Castilla y León	Si	Si	Si		Si		Si			Si	Si	Si	Si		P	Si	11
Castilla La Mancha	Si	Si			Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	14
Cataluña	Si	Si		Si	Si	Si	Si		Si	Si	Si	Si	Si		Si	Si	13
Comunidad Valenciana	Si	Si			Si		Si	Si		Si	Si	Si	Si			Si	10
Extremadura	Si	Si			Si		Si			Si	Si	Si	Si			Si	9
Galicia	Si	Si			Si		Si			Si	Si	Si	Si		P	Si	10
Madrid	Si	Si			Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	14
Murcia																	-
Navarra	P	Si			Si	Si		Si		Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	12
País Vasco	P	Si			Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	14
Rioja	Si		Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si		P	Si	14
Ceuta																	-
Melilla																	-
Total	16	13	3	3	16	9	14	10	9	16	15	16	16	7	12	16	

De las 16 categorías, que agrupan un total de 50 datos de los certificados, solamente las columnas de referencia catastral, municipio y las relativas al consumo de energía primaria no renovable, emisiones de GEI y sus clases energéticas y la fecha de emisión del certificado se publican en todos los casos. Aunque con algunas excepciones, como la referencia catastral de Navarra y País Vasco, que corresponde con sus propios catastros o las Islas Baleares que publica una única clase energética.

4.4.1.2. Recopilación

Las bases de datos de los CEE se pueden descargar de forma automática, bien a través de una API donde realizar la consulta, o mediante enlaces de descarga de archivos, lo que permite automatizar su recopilación y posterior tratamiento. Las CCAA ofrecen sus datos en uno o varios formatos, sin que actualmente exista un estándar o una uniformidad en los datos, la tabla 9 muestra un listado de los formatos y codificaciones (*encodings*) que ofrecen las distintas CCAA.

Tabla 9. Formatos y codificaciones de los archivos de CEE por Comunidad Autónoma.
 Elaboración propia, adaptación de la figura publicada en [100].

Formato del archivo	Comunidad Autónoma
CSV, encoding="UTF-8"	Aragón, Castilla y León, Comunidad Valenciana, Navarra, País Vasco
CSV, encoding="UTF-8 with BOM"	Islas Baleares, Cataluña
CSV, encoding="ANSI"	Castilla La Mancha, Canarias, Cantabria, Galicia, La Rioja, Madrid
XLSX, encoding="UTF-8"	Aragón, Asturias, Cantabria, País Vasco, Navarra
XML, encoding="UTF-8"	Andalucía, Aragón, La Rioja, País Vasco, Navarra
XML, encoding="ANSI"	Castilla La Mancha, Galicia
XLS, encoding="UTF-8"	Castilla y León, Comunidad Valenciana
XLS, encoding="ANSI"	La Rioja, Extremadura
JSON, encoding="UTF-8"	Aragón, Castilla y León, La Rioja, País Vasco, Galicia, Navarra
Shp or geojson	Cataluña

4.4.1.3. Tratamiento

Dado que los datos se ofrecen de forma heterogénea, con cada CA proporcionando información distinta, en formatos y codificaciones diferentes, resulta imprescindible definir una estructura común que permita unificar y homogeneizar la información.

Con este objetivo, se ha diseñado una tabla estándar a la que se han adaptado todos los conjuntos de datos suministrados por las CCAA. Esta tabla integra la información más relevante contenida en los CEE, garantizando la consistencia de los datos en los análisis posteriores.

El listado completo de los campos incluidos en la tabla estándar se detalla en el apartado C.3 del Anexo C, donde se describe la estructura final y la correspondencia con las variables originales de cada conjunto de datos.

4.4.2. Catastro INSPIRE

El Catastro INSPIRE es un proyecto enmarcado dentro de la Directiva INSPIRE (*Infrastructure for Spatial Information in the European Community*), cuyo objetivo es crear una infraestructura de información geoespacial en Europa para mejorar la toma de decisiones medioambientales y facilitar el acceso a datos espaciales entre los Estados miembros de la Unión Europea. En el contexto del Catastro INSPIRE en España, el proyecto se centra en adaptar la información catastral a los estándares europeos establecidos, lo que permite que la información catastral de España sea más accesible, interoperable y útil para análisis a nivel europeo.

El catastro INSPIRE en España está gestionado por la Dirección General del Catastro para la mayor parte de España, quedando Navarra y las provincias del País Vasco gestionadas por sus propios catastros. Esta segregación en diferentes catastros con diferente estructura de funcionamiento y con formas diferentes de proporcionar los datos es una barrera actualmente para la integración de los datos de los diferentes catastros, a futuro cuando se integren los diferentes catastros de Navarra y País Vasco en lo que indica la directiva INSPIRE será posible incluirlos.

Los Servicios INSPIRE de Cartografía Catastral ofrecidos por la Dirección General del Catastro están estructurados en 3 niveles de información [110]:

- Parcela catastral
- Direcciones
- Edificios

Para el desarrollo de la tesis se emplearán los datos de la categoría edificios, compuestos a su vez por las capas denominadas *Building*, *BuildingPart* y *OtherConstructions*, de la cual interesa la primera para generar los modelos.

Los datos que incluye hacen referencia a los edificios construidos, identificados a través de la referencia catastral de la parcela catastral a la que pertenecen. Entre ellos destaca la georreferenciación de los edificios, con la huella en planta del edificio.

La información aportada en el Catastro INSPIRE se resume en el apartado C.4 del anexo C.

4.4.3. Catastro alfanumérico

La Dirección General del Catastro pone a disposición de los usuarios una gran cantidad de información, en particular en este apartado se va a especificar la empleada en esta investigación, correspondiente a la denominada información catastral alfanumérica.

Los datos son alfanuméricos, cadenas de caracteres que forman una tabla de datos, similar a un archivo de Excel, no contienen información georreferenciada sino únicamente texto describiendo en columnas la información almacenada de los edificios.

Estos datos están organizados en cadenas de mil caracteres, donde cada posición de los mismos indica el valor que representa, en una estructura definida en el fichero informático de remisión del catastro [198]. Siendo, por ejemplo, los dos primeros caracteres de la fila el tipo de registro y, cuando no se especifica información o se requiere dejar espacio hasta la próxima posición del siguiente dato, se rellena con ceros.

Estos archivos CAT contienen gran cantidad de información, organizados según el tipo de dato al que hacen referencia.

Estos datos se organizan a partir del tipo de registro, el tipo de elemento catastral del que aportan información, los tipos de registro que contiene el catastro alfanumérico son [130]:

- Finca. Corresponde a la parcela catastral.
- Unidad Constructiva. Representa un edificio o un conjunto de construcciones particularizadas dentro de un edificio.
- Inmueble. Identifica cada uno de los bienes inmuebles dentro de una parcela catastral.
- Construcción. Identifica cada uno de los locales existentes en un bien inmueble.
- Reparto de elementos comunes. Identifica los elementos constructivos cuyo valor se reparte entre los demás elementos de construcción.
- Cultivos. Identifica cada subparcela de cultivo existente dentro de la parcela catastral.

Cada tipo de registro trata la información a una escala diferente, que va desde la finca que contiene la información general de la parcela, descomponiéndose en los diferentes tipos de registro que componen cada elemento de esa parcela. En esta investigación se ha empleado la información contenida en los tipos de registro de finca, unidad constructiva, inmueble y construcción.

De entre los diferentes tipos de registro hay que destacar dos: la finca y el inmueble.

La finca o parcela catastral es la unidad fundamental de información, delimita una porción de suelo concreta, por ejemplo, la parcela de un edificio plurifamiliar o la parcela de una vivienda unifamiliar. La finca se identifica con una referencia catastral de 14 dígitos y se dividen en parcelas catastrales urbanas y rústicas.

El inmueble corresponde con cada elemento individual de la finca susceptible de un aprovechamiento independiente [130], por ejemplo, una vivienda o un local dentro de un edificio plurifamiliar, o la vivienda (los m² construidos) dentro de una parcela de vivienda unifamiliar, y se definen con una referencia catastral de 20 dígitos.

Estos dos tipos son los más empleados y sobre los que se estructura la jerarquía del catastro, siendo los que poseen la referencia catastral que los identifica, el resto de los tipos de registro poseen identificadores que permiten asociar sus datos a los inmuebles y fincas a los que pertenecen. Pero su uso es secundario y no se emplean de forma tan asidua, por ejemplo, desde el visor del catastro sus códigos no son visibles.

Un punto clave a considerar es el potencial de combinar los datos de este catastro alfanumérico con el resto de información disponible, para esto hay una problemática importante a salvar y un elemento que servirá de clave de unión entre los datos:

- Las diferencias estructurales entre catastros: Los datos del catastro alfanumérico no están organizados de la misma manera que los del catastro vectorial ni los modelos INSPIRE. Aunque todos comparten la escala común de la parcela catastral o finca, existen diferencias en las subdivisiones de escalas inferiores:
 - En el catastro alfanumérico, la subdivisión se realiza en función de elementos de uso o propiedad, como viviendas, locales o unidades funcionales.
 - En el catastro vectorial y en el INSPIRE, la subdivisión responde a volumetrías, representando edificios dentro de una parcela y diferentes volúmenes dentro de un mismo edificio.

De modo que no existe una correlación uno a uno entre la información de los catastros a diferentes escalas inferiores a la de la parcela catastral.

- La referencia catastral como clave de unión: la finca y el bien inmueble son los dos tipos de registro identificados mediante una referencia catastral, lo que permite su identificación unívoca, este punto es fundamental para poder combinar la información tanto entre catastros como, por ejemplo, con los certificados energéticos, ya que es a la escala a la que realizan, edificio completo o inmueble (vivienda, local terciario).

Por ello la finca o parcela catastral será la unidad de información fundamental en la investigación, ya que es combinable con todas las fuentes. Lo que se complementará con la de inmueble que aporta información a escala más detallada, aunque solamente de forma alfanumérica. Los datos sobre unidad constructiva y construcción se emplearán para obtener más información para el modelo a las escalas de finca y de bien inmueble.

En cuanto a la información disponible de cada tipo de registro se puede encontrar disponible en [198], y se resume en el apartado C.5 del anexo C.

4.4.4. Modelo Digital del Terreno

Un Modelo Digital del Terreno (MDT, *Digital Terrain Model*) es una forma de representar zonas terrestres mediante imágenes 2D, donde la elevación del terreno se representa según el tono de gris del píxel. Aunque no existe una definición concreta de cada término, generalmente los MDT se subdividen en dos tipos basados en las capas de información que contienen [199].

Empleando el término de Modelo Digital de Elevaciones (MDE, *Digital Elevation Model*) para modelos del terreno sin obstáculos como árboles o edificios, y empleándose el término Modelo Digital de Superficie (MDS, *Digital Surface Model*) cuando el modelo incluye todos los elementos incluyendo los edificios y la vegetación. En la figura 14 se muestra un ejemplo de ambos modelos aplicados a la misma zona, estos modelos tienen múltiples aplicaciones en campos que van desde la arquitectura a la hidrología, siendo herramientas que aportan gran información sobre el terreno a analizar.

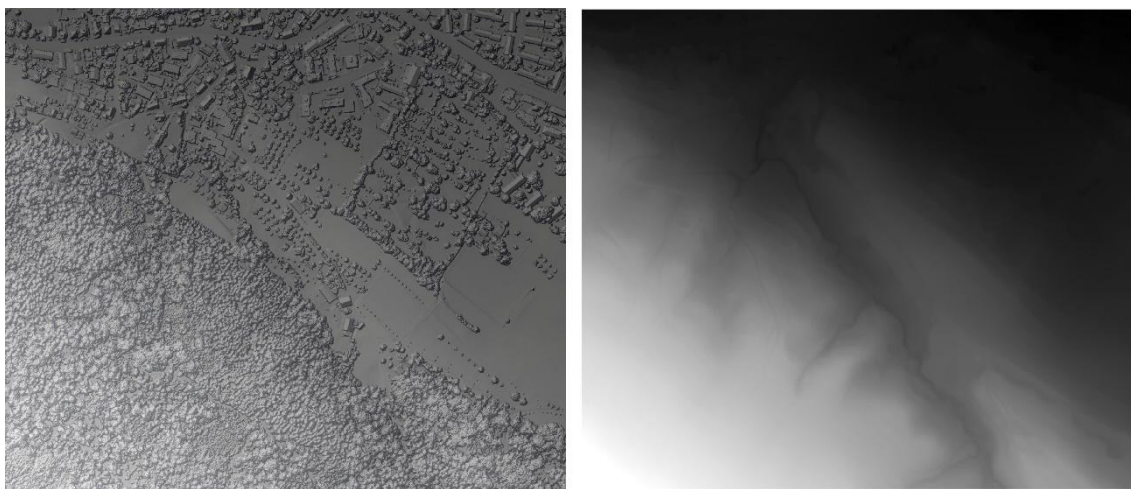


Figura 14. Izquierda: Modelo Digital de Superficie del área de Oerlikon, Suiza. Derecha: Modelo Digital de Elevaciones del mismo lugar. Elaboración propia a partir de datos publicados por la *Federal Office of Topography* en [200].

Estos modelos se elaboran comúnmente a partir de nubes de puntos LiDAR que se estructuran y ordenan en diferentes categorías. En la figura 13 se muestra cómo es una nube de puntos clasificada y su separación en las capas de suelo, edificios y vegetación.

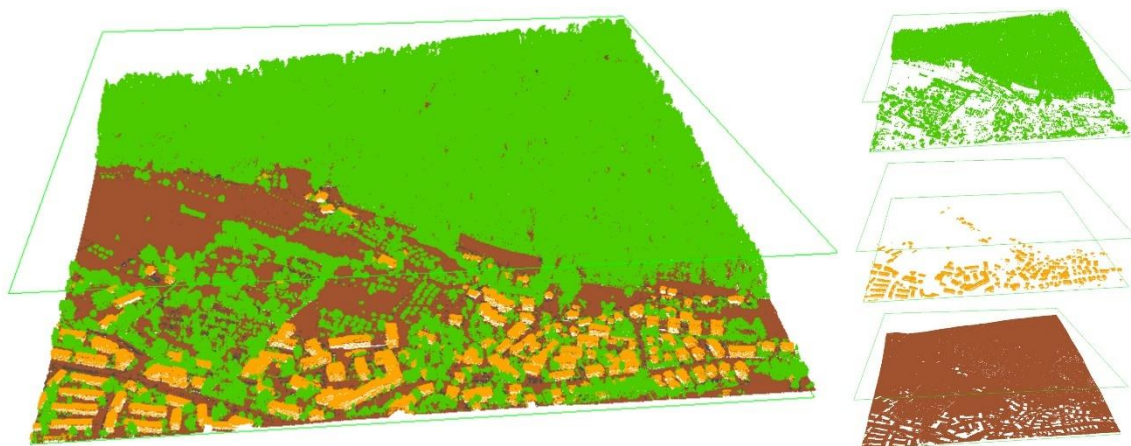


Figura 15. Nube de puntos del área de Oerlikon, Suiza generada a través de datos LiDAR. Elaboración propia a partir de datos publicados por la *Federal Office of Topography* en [200].

En el caso de España estos datos son proporcionados por el CNIG [179], tanto en ficheros laz (archivos comprimidos de nubes de puntos) que permiten generar los MDE y los MDS, como en ficheros GeoTIFF para los MDE ofreciendo la información ya procesada. Esta contiene en sus metadatos información geográfica que permite georreferenciar su ubicación y poder combinar diferentes conjuntos de datos de forma precisa al ser compatibles. En España los datos están publicados en el Sistema de Referencia de Coordenadas (SRC) europeo ETRS89 para la península, Baleares, Ceuta y Melilla y en el SRC REGCAN95 para las Islas Canarias [201], ambos compatibles con el sistema WGS84, el sistema global.

4.4.4.1. Creación de las Zonas Climáticas

La información ofrecida por el CNIG en abierto se va a emplear para generar un mapa de zonas climáticas de toda España que permita vincular a cada edificio la zona climática que le corresponde.

Para ello se emplea el conjunto de datos del CNIG, denominado Modelo Digital del Terreno - MDT200 2ª cobertura, un MDT sin edificios ni vegetación con un paso de malla de 200 metros, es decir, cada pixel corresponde a 200 metros en la realidad.

La elección de esta fuente de información se debe a dos razones:

- Permite generar un MDT de todo el país con una precisión suficiente. La altitud de la parcela es bastante precisa, ya que la fuente original de los datos presenta un margen de error aproximado de ± 30 cm. y la línea que determina la zona climática podrá variar aproximadamente 200 metros, lo que se considera una precisión ampliamente suficiente para un modelo a escala nacional.
- El modelo obtenido es muy razonable en demanda de recursos y tiempo de cálculo, de forma que es compatible con el resto de los modelos a emplear al no demandar demasiados recursos.

Las zonas climáticas en edificación están determinadas en el Código Técnico de la Edificación (CTE) en el Documento Básico de Ahorro de Energía (HE) [180], en cuyo Anejo B Zonas climáticas, establece mediante una tabla la zona climática correspondiente a cada lugar de España, esta tabla está organizada a partir de la provincia donde se ubica el edificio y la altura respecto al nivel del mar de la parcela en que se encuentra el edificio.

Se parte de la tabla de las zonas climáticas y se va a combinar la información del MDT200 con el mapa de provincias de España ofrecido también por el CNIG en el conjunto de datos denominados 'Límites municipales, provinciales y autonómicos' [179].

Una vez obtenidos los datos de partida, se generan las curvas de nivel cada 50 metros con el MDT200 y se divide cada provincia según lo indicado en la tabla del CTE-HE. En función de la altura se asignan las zonas climáticas correspondientes a cada segmento de la provincia, obteniendo como resultado el mapa de zonas climáticas que se muestra en la figura 16.

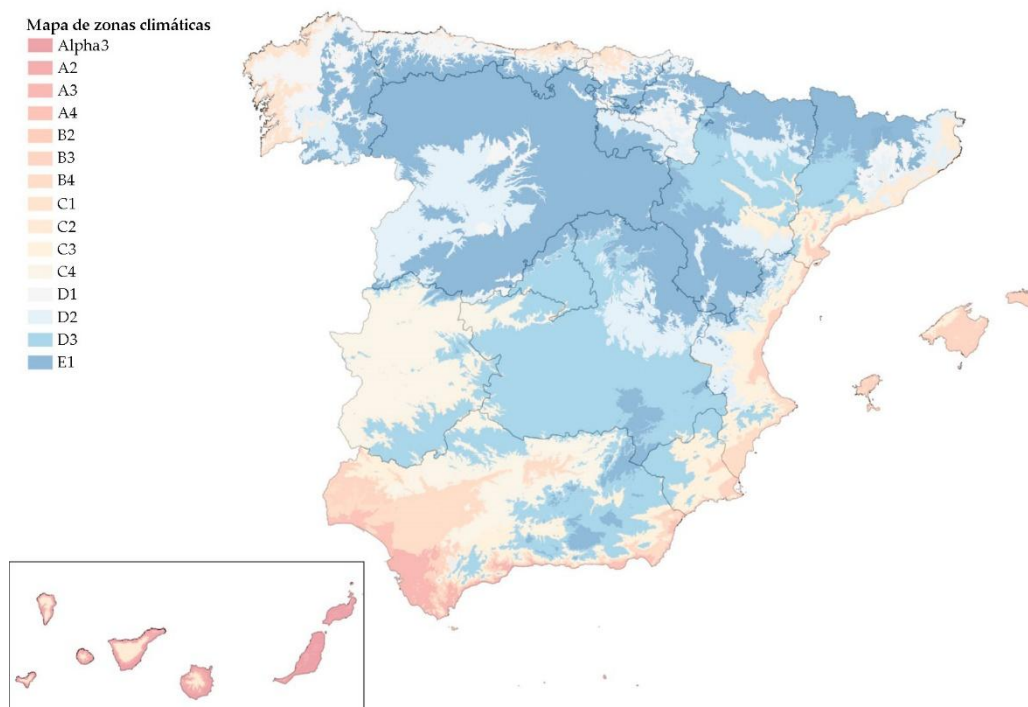


Figura 16. Mapa de zonas climáticas de España. Elaboración propia, publicada en [5].

El mapa contiene todas las zonas climáticas de España tal y como se definen en la CTE-HE, estableciendo una letra para el clima en invierno y un número para el clima en verano.

El clima en invierno se estructura en letras: Alpha (α), A, B, C, D, E, ordenado de más cálido, con letra Alpha, hasta más frío, con letra E. El clima en verano se numera del 1 al 4, siendo el verano más suave el 1 y el más cálido el 4.

Como puede observarse en la figura 16, a escala nacional se tiene un clima predominante de las zonas más frías en invierno, letras D y E, que se encuentran en las zonas interiores de la península. Quedando la costa española en las letras B y C, a excepción del litoral de Andalucía que es letra A y las Islas Canarias que son Alpha3 en su mayor parte. Las zonas climáticas en verano siguen unos patrones muy similares, quedando los veranos más calurosos en la zona sur principalmente, a excepción de la zona C3, C4 y D3 que se adentra en el interior de la península.

4.4.5. Estadísticas nacionales

El modelo se complementa mediante estadísticas nacionales, de forma que puedan realizarse estudios más detallados, como se analiza en el libro RuralREGEN [202], existe una importante necesidad de analizar las características y necesidades específicas del parque edificado rural.

Para ello se ha empleado el censo de población del INE, en particular el denominado 'Cifras oficiales de población de los municipios españoles' en aplicación de la Ley de Bases del Régimen Local (Art. 17) [181], que contiene el número de habitantes totales y desglosados por sexo de cada municipio de España y aporta el código de municipio del INE, lo que lo hace compatible con el resto de información aportada. A tenor de ello se caracteriza el municipio por su número de habitantes censados.

Siguiendo el mismo criterio que en RuralREGEN [202], el parque se clasifica en:

- Rural si la población es menor o igual a 20.000 habitantes
- Urbano si es mayor a 20.000 habitantes

Y se subdivide en diferentes tamaños de rural y urbano según se muestra en la tabla 10.

A partir de lo indicado en la tabla 10 se podrá añadir la dimensión del tamaño de municipio al modelo, permitiendo analizar esta característica en los edificios. En la figura 17 se puede apreciar la distribución de los municipios por su tamaño en el panorama nacional. La incorporación de este dato en los análisis posibilitará estudiar las características que definen el parque residencial rural, una parte del parque edificado tanto con características tipológicas [202] como sociales [203] y energéticas diversas al parque edificado urbano [204].

Tabla 10. Clasificación por número de habitantes en los municipios. Elaboración propia, publicada en [202].

Rural	Pequeño rural	≤ 100
		101-500
		501-1.000
		1.001-5.000
	Gran rural	5.001-20.000
Urbano	Pequeño urbano	20.001-50.000
		50.001-100.00
	Gran urbano	≥ 100.001

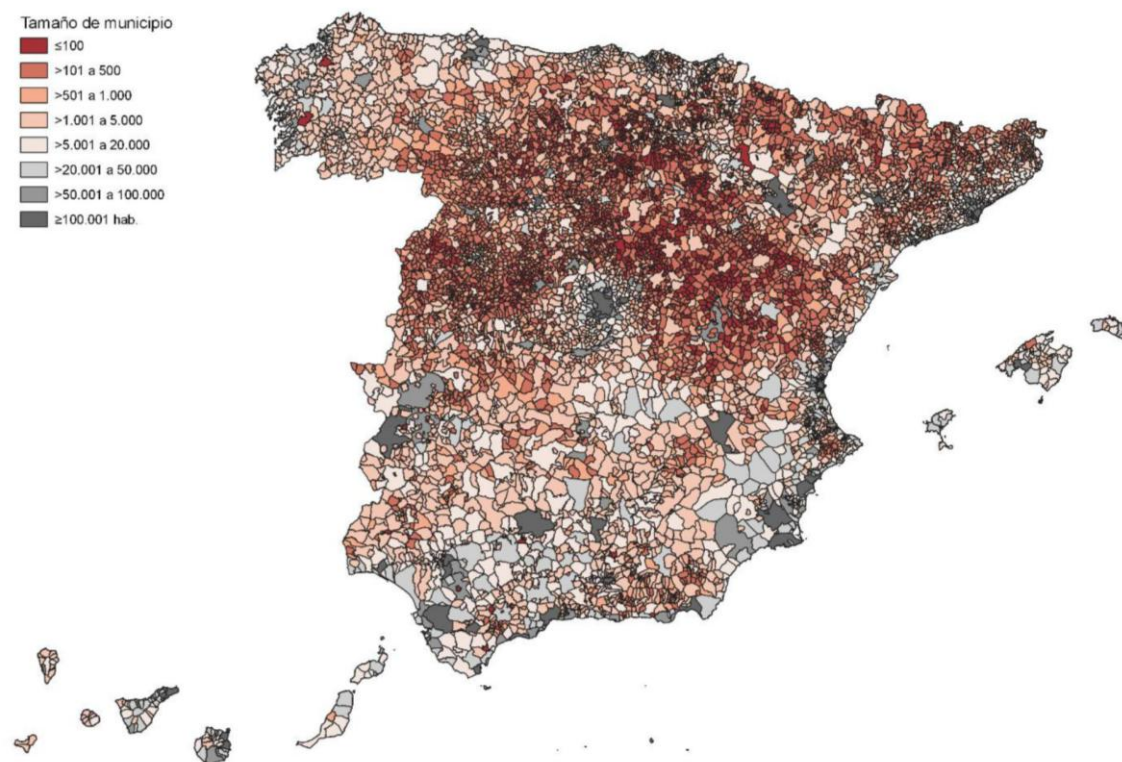


Figura 17. Mapa de España por tamaño de municipio. Elaboración propia, publicada en [202].

El modelo está diseñado para ser fácilmente accesible y ampliable con nuevos datos. Al incluir el código de municipio del INE y la georreferenciación de los edificios, puede integrarse con diversas fuentes de información a diferentes escalas. Por ejemplo, el INE ofrece datos desglosados generalmente por municipio, mientras que el Atlas de la Vulnerabilidad Urbana [205] y el Atlas de la Edificación Residencial en España [206], proporcionan información a nivel de sección censal. Asimismo, el CNIG publica las delimitaciones de las secciones censales en formato abierto, lo que permite combinarlas con los edificios mediante una unión espacial. Sin embargo, aunque las páginas oficiales de los Atlas anuncian que actualizarán estos datos con información de 2021, actualmente solo están disponibles las versiones correspondientes a los años 2001, 2011 y, en algunos casos, 2018. Esta falta de actualización limita su incorporación en el presente estudio, pero podría considerarse como una fuente valiosa en futuras investigaciones.

4.5. Proceso de extracción, transformación y carga

El proceso denominado ‘extracción, transformación y carga’ (*Extract, transform, load* (ETL)) es fundamental en el contexto del Big Data y del análisis avanzado, ya que permite consolidar datos dispares en un único entorno accesible para herramientas de análisis, Machine Learning y generación de estudios complejos [207]. Además, contribuye a la mejora del manejo y el acceso a los datos al asegurar que la información sea precisa, confiable y esté disponible para los usuarios en el momento oportuno y de forma accesible.

El proceso se compone de tres pasos: se recopila la información de diferentes fuentes (extracción), se transforman los datos para hacerlos aptos para analizarlos (transformación) y se almacenan en su nueva ubicación (carga). En la actualidad, el proceso ETL ha evolucionado para adaptarse a los nuevos retos tecnológicos, incluyendo la integración en tiempo real (*streaming ETL*) y el uso de plataformas en la nube que ofrecen escalabilidad y flexibilidad para gestionar volúmenes crecientes de datos.

El paso de transformación es el más complejo, a continuación, se detallan los pasos principales para clarificar el procesamiento de los datos realizado en el modelo:

- Preprocesado de los datos. Esta etapa inicial se centra en preparar los datos extraídos para su transformación. Incluye tareas como la eliminación de duplicados, la estandarización de formatos (por ejemplo, fechas o unidades de medida) y la homogeneización de datos provenientes de diferentes fuentes. El objetivo principal es homogenizarlos para facilitar su manipulación en pasos posteriores.
- Detección de errores y valores anómalos. Durante este paso, se identifican y manejan datos que contienen errores (por ejemplo, años de construcción pertenecientes al futuro), y valores anómalos fuera de rango (valores que siendo posibles se consideran poco razonables), inconsistencias entre campos o entradas faltantes.
- Conversión de los datos. Implica la optimización de los tipos de datos, la normalización de atributos categóricos o la creación de nuevas variables derivadas de los datos originales. Este paso asegura que los datos sean compatibles con las herramientas y los procesos de análisis posteriores.

4.6. Tratamiento de los datos

En los siguientes apartados se va a desarrollar el proceso ETL de los datos que se ha realizado para construir el modelo. Este proceso está desglosado en la figura 13 'Flujo de trabajo de la metodología específica para elaborar el modelo UBEM a escala nacional basado en CEE aplicada al caso de España' del apartado 4.3 y, en cada subapartado, se indica el paso correspondiente en la figura al que se hace referencia.

Para procesar los datos es necesario tratar los alfanuméricos y los geoespaciales. El tratamiento de datos alfanuméricos consiste en la gestión y análisis de información que combina caracteres alfabéticos y numéricos. Este tipo de información es fundamental en múltiples disciplinas, ya que permite almacenar y procesar contenidos como nombres, direcciones, códigos, descripciones o identificadores únicos. Los datos se almacenan en tablas de datos, similares en apariencia a una hoja de cálculo en cuanto a que los datos se almacenan en filas y columnas [208].

El tratamiento de datos geoespaciales consiste en recopilar, procesar, analizar y visualizar información que tiene una referencia espacial o geográfica. A través de herramientas GIS y programación se homogeneizan los SRC de los archivos, se crea el índice espacial de los datos y se realizan uniones y operaciones espaciales para potenciar la información que contienen.

4.6.1. Tratamiento de los CEE

Este paso corresponde en la figura 13 al paso A.1 y consiste en el proceso ETL de la información disponible en abierto de los CEE desde la descarga de la información en bruto hasta la generación de unos datos unificados y con una estructura y un formato adecuados para poder combinarlos con otras fuentes de información.

Los datos de los CEE son publicados en acceso abierto por 16 CCAA, lo que en la práctica significa 16 formas distintas de proporcionar la información, como identificaron Terés-Zubiaga et al. [209]. Por tanto, el objetivo de este paso es transformarlos y analizarlos para obtener una base de datos común y homogénea a nivel nacional, que permita analizar el desempeño energético de los edificios certificados en España.

Debido a la disparidad de los datos proporcionados por cada CCAA española, se decidió trabajar con los datos mínimos esenciales de los CEE.

Este paso se compone de las siguientes subetapas:

- **Paso A.1.1 - Descarga masiva de CEE.** Se descargó la información publicada por las diferentes CCAA. En la tabla 8 de la sección '4.4.1.1.

Estructura de los datos' se muestra la información de los CEE proporcionada por las CCAA.

- **Paso A.1.2 - Preprocesamiento de datos de los CEE.** La información publicada por las CCAA presenta diferencias no solo en los datos, sino también en los formatos. Por este motivo, se realizó un preprocesamiento de los datos.

La tabla 9 de la sección '4.4.1.2. Recopilación' muestra los diferentes formatos de archivo publicados por cada CCAA.

La información se estandarizó, organizándola según un conjunto homogéneo de datos para que pudiera ser analizada en conjunto. En este estudio se utilizaron los formatos CSV y Parquet con codificación UTF-8, debiendo parsear caracteres no soportados en otros formatos y transformar lenguajes basados en niveles jerárquicos a datos en formato CSV para facilitar su análisis.

- **Paso A.1.3 - Detección de valores atípicos en los CEE.** Algunos CEE contienen información incorrecta o incoherente, como también se ha detectado en otros estudios [210]. Por esta razón, se realizó una detección de valores atípicos siguiendo los criterios establecidos en la tabla C.6 del anexo C. Tras este filtrado, se eliminaron el 12,7% de los CEE, quedando 3.423.239 registros.

Como resultado del Paso A.1, se obtuvo una base de datos con los CEE del territorio nacional en un formato estandarizado, tanto a escala de edificio como de inmueble.

4.6.2. Tratamiento de datos alfanuméricos del catastro nacional

Corresponde con el paso A.2 de la figura 13. La información proporcionada por el catastro alfanumérico tiene un alto nivel de detalle, aunque no está georreferenciada [150]. La información se ofrece en seis categorías de datos, siendo dos de ellas las principales debido a que tienen asignada una referencia catastral: las parcelas y los bienes inmuebles. Las parcelas están identificadas con referencias catastrales de 14 dígitos, y los bienes inmuebles con referencias de 20 dígitos. La información de las unidades constructivas y de las construcciones se emplearán asociando su información a las parcelas y a los inmuebles, los elementos comunes y las tierras de cultivo no ofrecen información relevante para este estudio y no se han incluido.

La referencia catastral es crucial en este estudio, ya que permite la conexión entre los datos catastrales alfanuméricos, los datos catastrales de INSPIRE y los datos de los CEE.

Entre estas seis categorías, se utilizaron datos de las primeras cuatro porque son las que proporcionan información relacionada con edificios. Más detalles

sobre la información útil para este estudio, obtenida de estas cuatro categorías en el catastro alfanumérico de España, se encuentran en la en el apartado C.5 del anexo C.

El paso A.2 se compuso de las siguientes subfases:

- **Paso A.2.1 – Descarga masiva de datos alfanuméricos del catastro.**

El documento [211] define los servicios web libres del catastro de España. Sin embargo, la consulta de los datos sobre un edificio no está incluida en esos servicios. El catastro español no dispone de una API que permita descargar directamente los datos alfanuméricos. Existe la denominada ‘Consulta masiva de datos no protegidos’ que sí se realiza de forma automática a través de una petición al servidor, sin embargo, esta característica no está diseñada para este fin. Se deben identificar individualmente los edificios para consultar los datos, limitados a consultas XML de hasta 250 Kbytes, lo que equivale a acceder a aproximadamente 5.500 referencias catastrales.

Desde el 16 de marzo de 2023, es posible descargar toda la información a nivel nacional del catastro alfanumérico por provincias. Sin embargo, no ofrecen ninguna posibilidad de automatizar las consultas. Por este motivo, la descarga masiva de datos alfanuméricos se realizó manualmente descargando los paquetes de información de cada una de las 52 provincias españolas. Sin embargo, la extracción y gestión de datos fueron automatizadas.

- **Paso A.2.2 – Agrupación de datos a escalas de edificio y unidad constructiva.**

Dado que para los indicadores de progreso es relevante conocer los datos tanto por edificios como por bienes inmuebles, se agruparon todos en estas dos escalas.

En la directiva EPBD, el análisis de los datos a escala edificio y a escala *building unit* formó parte de las propuestas de indicadores entre 2021 y 2023 y, aunque no está definida específicamente en la EPBD de 2024, aporta un nivel de detalle interesante para conocer la información por viviendas o separar el uso terciario entre locales y edificios terciarios, con necesidades de intervención diferentes. En este estudio, se entiende que una *building unit*, traducido en la legislación como ‘unidad de edificio’ es un inmueble, una propiedad correspondiente a una parte de un edificio, ya sea residencial o no residencial. Por ejemplo, en un bloque de viviendas, una vivienda y una oficina comercial en la planta baja son inmuebles diferentes. La figura 18 muestra la relación entre las categorías catastrales alfanuméricas y las escalas de datos del modelo.

Como se observa en la figura, cuando en una parcela hay dos edificios, no es posible diferenciarlos. Esto se debe a que las unidades constructivas en el catastro alfanumérico no tienen una referencia

catastral propia, sino la de la parcela. Por este motivo, en nuestro modelo, un edificio se considera como un edificio o conjunto de edificios incluidos en la misma parcela catastral.

Finalmente, dado que los MEPS de la EPBD de 2024 diferencian entre edificios residenciales y no residenciales, es necesario asignar un uso principal a cada edificio en nuestro modelo. La información sobre el uso principal del edificio y de los inmuebles se añade considerando como uso principal aquel que ocupa la mayor superficie (ver ejemplo en la figura 18) para poder clasificar los edificios, conservando el resto de la información internamente en el modelo.

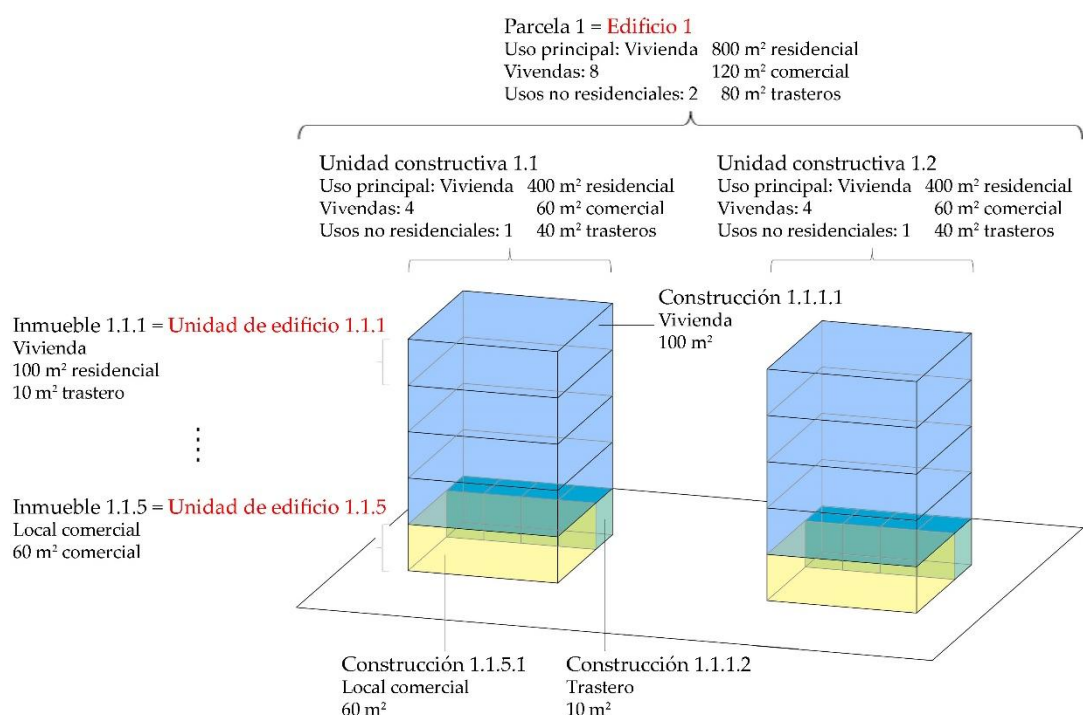


Figura 18. Ejemplo de una parcela para ilustrar la relación entre las categorías catastrales alfanuméricas (en negro) y las dos escalas del modelo basado en CEE (en rojo). Elaboración propia, publicada en [100].

- **Paso A.2.3 – Limpieza de datos.**

En teoría, las referencias catastrales son únicas y permiten identificar inequívocamente un bien inmueble o una parcela catastral. Sin embargo, se encontraron referencias catastrales que identificaban más de una parcela o bien inmueble. Como esto constituye un error, dichas referencias fueron eliminadas del estudio. En total, se eliminaron 7.423 referencias catastrales por esta razón.

Como resultado del paso A.2, se obtuvieron dos conjuntos de datos alfanuméricos del catastro con gran nivel de detalle, uno a escala de edificio y otro a escala de inmueble.

4.6.3. Gestión de datos del catastro INSPIRE

La gestión de los datos del catastro INSPIRE se corresponde con el paso A.3 y se llevó a cabo mediante los siguientes pasos:

- **Paso A.3.1 – Descarga masiva del catastro INSPIRE.**

La principal ventaja de la información vectorial del catastro INSPIRE respecto a la correspondiente del catastro alfanumérico es que dispone de un servicio ATOM que permite descargar masivamente todos los datos de forma sencilla y automatizada.

ATOM es un formato estandarizado de redifusión de contenidos web basado en XML, diseñado para permitir la sindicación de información de manera estructurada y automática. ATOM define de forma clara cómo organizar los metadatos y el contenido, incluyendo título, autor, fecha de publicación, identificadores únicos y enlaces al contenido original. Está definido oficialmente en la RFC 4287 por la IETF (*Internet Engineering Task Force*).

Como la información se descarga a través de un enlace por municipio, y España cuenta con más de 8.000 municipios, la automatización mediante ATOM facilita la descarga de los datos de todo el país en un corto periodo de tiempo. Para ello, se genera una secuencia de códigos que permiten:

- Descargar automáticamente la información desde el servicio ATOM.
- Extraer los archivos descargados en formato .zip.
- Seleccionar los archivos requeridos, que en este caso son los denominados 'building.gml'.
- Unirlos en un único shapefile que contiene toda la información de los edificios a nivel nacional, lo cual permite realizar análisis a escala nacional con herramientas SIG.

- **Paso A.3.2 – Combinación de archivos a escala nacional.**

Tras la descarga masiva desde el catastro INSPIRE, los archivos catastrales se combinaron en un mapa a escala nacional, en el que cada edificio está georreferenciado en un único archivo.

- **Paso A.3.3 – Filtrado de referencias catastrales.**

Al igual que con el catastro alfanumérico, se identificaron referencias catastrales que correspondían a dos o más edificios. Dado que esto constituye un error catastral, dichas referencias fueron eliminadas del estudio. En total, se eliminaron 9.936 edificios por esta razón.

Como resultado del paso A.3, se obtuvo un mapa GIS con todos los edificios de España georreferenciados.

4.6.4. Tratamiento de datos adicionales

La gestión de datos adicionales, el paso A.4, incluye información que sin ser a escala de edificio ayuda a potenciar el modelo, consta de los siguientes pasos:

- **Paso A.4.1 – Generación del mapa de zonas climáticas.**

En España, las administraciones públicas nacionales no proporcionan mapas de zonas climáticas en formato SIG. Sin embargo, conocer la zona climática en que se ubica el edificio es clave para poder caracterizarlo energéticamente. Por ello, uno de los pasos necesarios para construir el modelo UBEM a escala nacional fue la creación de un mapa GIS que mostrara las zonas climáticas del país.

En España, el comportamiento energético de los edificios está regulado por el Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE) del Código Técnico de la Edificación (CTE). Esta normativa define 17 zonas climáticas en el país, de las cuales 12 se encuentran en la península y las Islas Baleares, y 5 en las Islas Canarias. Según el CTE DB-HE [180], las zonas climáticas de cada parcela en España se determinan en función de dos criterios: la provincia donde se ubica y la altitud sobre el nivel del mar (en intervalos de 50 m).

Las zonas climáticas están compuestas por una letra que clasifica las condiciones invernales (de A a E, y α) y un número que categoriza las condiciones estivales (de 1 a 4) [212]. Para crear un mapa GIS de las zonas climáticas, se realizó el siguiente proceso:

- Descarga masiva del MDT: Se descargaron específicamente los archivos del modelo denominado 'MDT de primera cobertura con malla de 200 metros (MDT_200)' proporcionados por la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de España [179]. Estos archivos emplean los sistemas de coordenadas ETRS89 en la Península, Baleares, Ceuta y Melilla, y REGCAN95 en las Islas Canarias, ambos compatibles con WGS84. Para generar el modelo, se usó la información en la zona UTM 30, que abarca toda la península, y la zona UTM 28 para las Islas Canarias. Estos archivos, en formato asc (Arc/Info ASCII Grid), se procesaron con el software QGIS para combinarlos y crear un mapa completo con todos los MDT de España (paso A.4.1.2).

Este nuevo modelo permite generar las curvas de nivel del terreno en todo el país cada 50 metros para determinar la zona climática de cada área (paso 4.1.3). El archivo resultante proporciona la altitud de cada parcela en España.

- Descarga de la información del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG): Se obtuvo la información de las provincias de España a partir del archivo denominado “Límites municipales, provinciales y autonómicos”, disponible en el Centro de Descargas del CNIG [179], que contiene la cartografía oficial de las delimitaciones territoriales [213]. Esta información se proporciona en formato shp (shapefile) y emplea el Sistema de Referencia de Coordenadas (SRC) ETRS89, mientras que las Islas Canarias utilizan el SRC WGS84.
- Combinación de las áreas provinciales y las curvas de nivel: En el software QGIS, se combinaron las áreas provinciales con las curvas de nivel generadas (paso A.4.1.4) para definir las correspondientes zonas climáticas. De este modo, se obtuvo un mapa SIG que representa las zonas climáticas de España (figura 16).
- **Paso A.4.2 – Tamaño de los municipios.**
De acuerdo con la propuesta para la revisión de la EPBD, los EM deben establecer un plan, respaldado por mecanismos financieros, para la mejora progresiva de las clases de desempeño energético de los edificios, con especial atención a las áreas rurales y aisladas. Por esta razón, resulta conveniente incluir en nuestro modelo información sobre el tamaño poblacional de los municipios, lo cual permite diferenciar entre áreas rurales y urbanas.
El INE proporciona datos sobre la distribución de los habitantes en los distintos municipios del país. Cada municipio tiene asignado un código por el INE, el cual también está presente en la información de las parcelas contenida en el catastro alfanumérico. Esto permite asociar a cada edificio información municipal del INE, como el tamaño del municipio en el que se encuentra. Posteriormente, se clasificaron los municipios en rurales hasta 20.000 habitantes, y urbanos desde 20.001 habitantes en adelante.

4.7. Generación del modelo

Una vez realizados todos los pasos A se ha tratado toda la información de forma que obtengamos unos datos de calidad y preparados para ser combinados con las diferentes fuentes de información.

A continuación se van a describir los pasos B, que implican la generación de una base de datos nacional con toda la información sobre los edificios certificados en España en abierto (paso B.1), la generación de un modelo GIS que incluye la información de todos los edificios de España disponible en los catastros más su zona climática y tipo de municipio (paso B.2) y un tercer modelo que incluye la

combinación de ambos pasos para generar un modelo que combina la información de todos los edificios de España y la información energética de los edificios certificados (paso B.3).

4.7.1. Generación del modelo de comportamiento energético

Se genera una base de datos nacional combinando la información de los CEE con la información catastral de los edificios. Esta información combinada permite realizar diferentes filtrados de los datos y obtener información energética y su relación con las características de los edificios.

- **Paso B.1.1 - Enriquecimiento de los datos de los CEE con el catastro alfanumérico.** Cada CEE se vinculó con los datos del catastro alfanumérico mediante las referencias catastrales. Esta unión permitió obtener información sobre el uso y la superficie construida de cada edificio certificado y de sus inmuebles.
- **Paso B.1.2 - Detección de valores atípicos en los CEE.** En esta etapa se emplearon criterios adicionales para descartar CEE no válidos. Algunos CEE carecían de datos catastrales válidos, otros certificaban un uso incorrecto, y otros estaban registrados en una Comunidad Autónoma equivocada. Todos estos CEE fueron eliminados. Más detalles sobre este proceso se presentan en el apartado C.7 del anexo C, y número y el porcentaje de CEE válidos por Comunidad Autónoma tras este proceso se desglosa en el apartado C.8 del anexo C.
- **Paso B.1.3 – Clasificación de los CEE por uso principal.** Los CEE se clasificaron según su uso principal en residencial y no residencial. Durante la gestión de los datos del catastro alfanumérico, ya se había asignado un uso principal a edificios e inmuebles, lo que permitió asociar esta información ahora a los CEE al estar vinculados con los datos gestionados del catastro alfanumérico.
- **Paso B.1.4 – Agrupación de certificados por edificio.** Un edificio puede contar con un CEE de edificio completo y/o con uno o varios CEE correspondientes a los diferentes inmuebles que lo componen (viviendas, locales comerciales, oficinas, etc.). En nuestro modelo, se proporciona información de los CEE en dos niveles:
 - A nivel de edificio: Se generó información de los CEE en esta escala, ya que es el nivel en el que opera el modelo final en GIS. Para ello, cuando un edificio no tenía un CEE de edificio completo, se calculó un valor promedio del consumo energético y de las emisiones de GEI de los CEE existentes en sus inmuebles.
 - A nivel de inmueble: Se mantuvo en el modelo la información de los CEE existentes en los inmuebles, lo que permitió conservar los

datos originales del desempeño energético de viviendas y locales individuales.

Para estimar la información a nivel de edificio en ausencia de un CEE general, se calculó el consumo medio de energía primaria no renovable y las emisiones de GEI como valores medios ponderados según la superficie construida de los inmuebles certificados, siguiendo las fórmulas (1) y (2) del apartado C.9 del anexo C.

Como resultado del paso B.1, se obtuvo una base de datos nacional a escala edificio y a escala inmueble basada en la información de los CEE y el catastro que incluye 2.966.479 CEE, correspondientes a 1.202.708 edificios y certificando un total de 3.811.061 inmuebles con una superficie construida total de 488.083.019 m².

4.7.2. Generación del modelo GIS nacional del parque edificado

Este modelo se desarrolló a partir de los siguientes pasos:

- **Paso B.2.1 - Asignación de la zona climática a cada edificio.**
Para asignar a cada edificio su correspondiente zona climática, se realizó una unión espacial entre el catastro INSPIRE y el mapa de zonas climáticas utilizando el software QGIS.
- **Paso B.2.2 – Combinación del catastro alfanumérico, el catastro INSPIRE y las zonas climáticas.**
La información del catastro alfanumérico y el resultado del paso B.2.1 se integraron para obtener una base de datos mejorada que incluye la información de ambos catastros junto con las zonas climáticas.
- **Paso B.2.3 – Asignación del tipo de municipio.**
Según la información sobre el número de habitantes en cada municipio obtenida del Censo de población (paso A.4.2.2), a cada edificio se le asignó un tipo de municipio, diferenciando entre rural y urbano en función de su ubicación.

Como resultado del paso B.2 se obtiene una base de datos GIS nacional mejorada del parque edificado, mostrada en la figura 19, que incluye las características físicas y geográficas del parque edificado nacional, así como datos sobre los municipios y las zonas climáticas en los que se encuentran los edificios. Este modelo contiene información de un total de 10.939.801 edificios, de los cuales 9.301.130 edificios tienen al menos un uso que requiere un CEE en alguno de sus inmuebles.

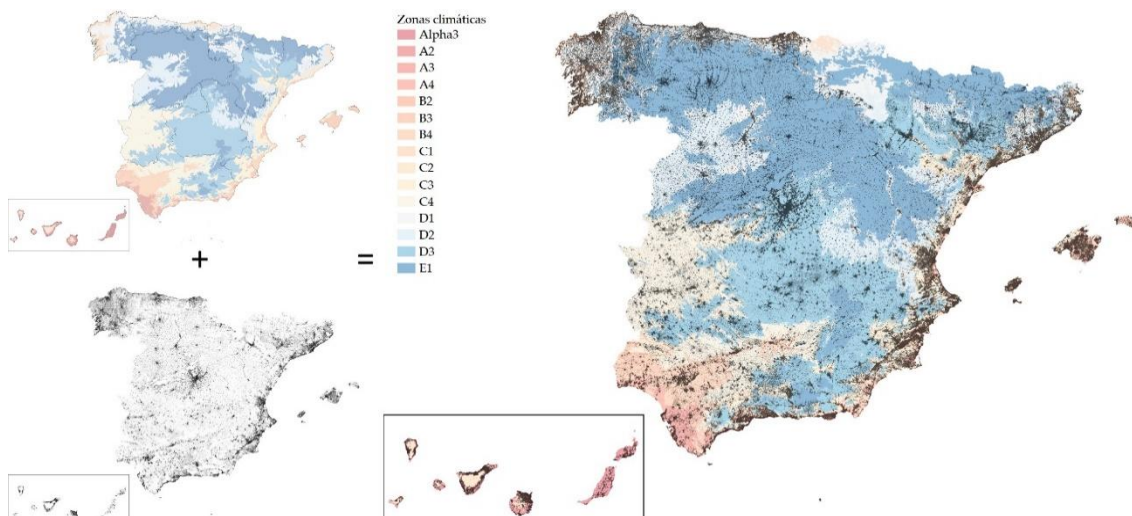


Figura 19. Edificios georreferenciados en España con su zona climática. Elaboración propia, publicada en [100].

4.7.3. Generación del UBEM nacional basado en CEE

Se obtuvo un modelo nacional de energía urbana de edificios basado en CEE, correspondiendo con el resultado B.3 de la figura 13, mediante la combinación de los modelos generados en los pasos B.1 y B.2.

4.8. Validación y aplicación del modelo

Una vez realizados todos los pasos A se ha tratado toda la información de forma que obtengamos unos datos de calidad y preparados para ser combinados con las diferentes fuentes de información.

4.8.1. Características del UBEM basado en CEE de España

El modelo generado incluye información sobre 10.939.801 edificios en España, de los cuales 1.202.708 cuentan con uno o más CEE, la figura 20 muestra una comparación visual de los datos obtenidos. Este modelo permite mapear y analizar los edificios del país mediante la integración de múltiples variables de distinta naturaleza: geográficas (CCAA, municipios, tipo de municipio), físicas (superficie, número de plantas, fecha de construcción), relacionadas con el uso (uso principal del edificio y uso de cada uno de sus inmuebles) y energéticas (zona climática, clase energética, consumo energético, emisiones de GEI), entre otras. Por lo tanto, constituye una herramienta con un gran potencial para establecer la trayectoria de rehabilitación del parque edificado nacional en España en respuesta a los estándares mínimos de eficiencia energética

establecidos por la Unión Europea. Asimismo, puede ser utilizada para definir trayectorias específicas por parte de las administraciones regionales y locales.

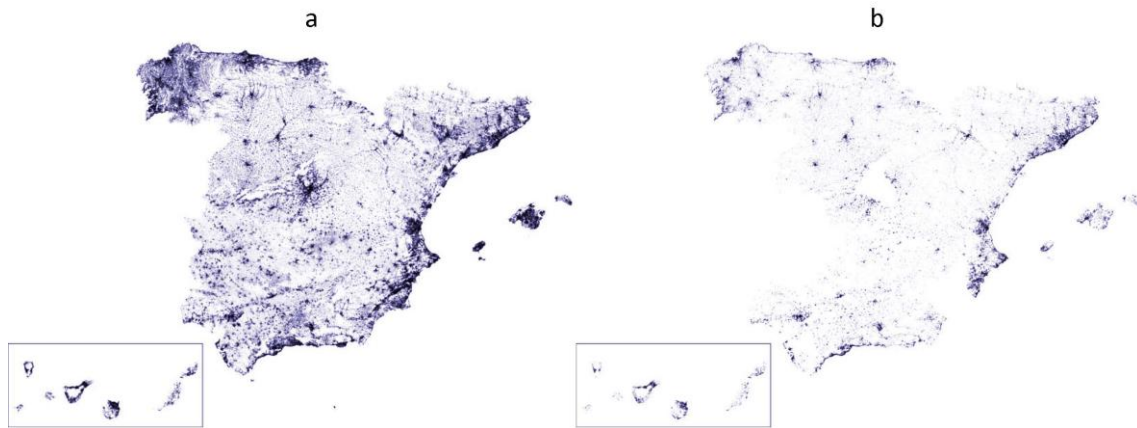


Figura 20. UBEM a escala nacional basado en CEE. En el panel izquierdo (a) se muestran todos los edificios incluidos en el modelo, mientras que en el panel derecho (b) se representan únicamente los edificios que cuentan con al menos un CEE. Elaboración propia, publicada en [100].

El nivel de detalle del modelo alcanza la escala de edificio, lo que permite obtener información para todas las ciudades y pueblos de España. Como ejemplo de este grado de detalle, la figura 21 muestra los edificios del centro de Barcelona clasificados según su consumo de energía primaria no renovable por metro cuadrado.



Figura 21. Edificios del centro de Barcelona clasificados según el consumo de energía primaria no renovable (CEPNR) por metro cuadrado. La escala de colores representa el consumo: **verde** para los edificios con menor consumo, rojo para los de mayor consumo, y gris para los edificios no certificados. Elaboración propia, publicada en [100].

4.8.2. Validación del modelo

4.8.2.1. Consumo de recursos y tiempo para construir el modelo.

Un aspecto clave en la generación de modelos a gran escala es el consumo que implican en términos de tiempo y recursos. Como se mencionó previamente, los modelos descritos en este artículo fueron generados utilizando un ordenador estándar. El tiempo requerido para generar automáticamente los modelos con este equipo se detalla en la tabla 11.

Tabla 11. Duración del proceso de generación automática de los modelos. CEE: Certificado de Eficiencia Energética. Elaboración propia, publicada en [100].

Paso	Datos de salida	Tiempo requerido		
A.1 CEE	3.920.354 CEE	2h	30 min	
A.2 Catastro alfanumérico	11.120.066 edificios	1h	3 min	53 seg
A.3 Catastro INSPIRE	12.340.420 edificios	2h		
A.4.1 Mapa de zonas climáticas	505.990 km ²	No automatizado		
A.4.2 Tamaño de municipio	8.131 municipios		4 seg	
B.1 Generación del modelo de comportamiento energético	2.966.479 CEE	4 min	40 seg	
B.2 Generación del modelo GIS nacional del parque edificado	10.939.801 edificios	9 min	30 seg	
B.3 Generación del UBEM nacional basado en CEE	10.939.801 edificios de los cuales 1.202.708 tienen CEE	1 min	20 seg	
Total		5h	49 min	27 seg

Con el fin de garantizar un manejo de los datos y una creación del modelo rápida y eficiente, se prestó especial atención al uso correcto de los formatos. Debido a la heterogeneidad de los datos de entrada provenientes de los CEE, se utilizó el formato CSV para unificarlos. Una vez que los datos fueron homogenizados y los errores filtrados, se empleó el formato Parquet para su gestión. Este mismo formato Parquet fue utilizado para la manipulación del catastro alfanumérico y de todos los datos tabulares.

Para la generación de los modelos GIS, se utilizó el formato Geoparquet, debido a su reducido tamaño y rapidez de lectura. La tabla 12 presenta una comparación del tiempo de cálculo en función de los formatos empleados.

El paso A.4.1 no fue automatizado debido a que no requiere actualizaciones periódicas, a menos que se produzca un cambio en la normativa que define las zonas climáticas.

Tabla 12. Consumo de tiempo para leer los archivos de los modelos y tamaño de los archivos generados. La comparación utiliza Pandas 1.5.3 y Geopandas v.12.2. Elaboración propia, publicada en [100].

Paso	Tiempo requerido: formato CSV	Tamaño de los modelos: CSV	Tiempo requerido: formato Parquet	Tamaño de los modelos: Parquet
B.1 Modelo de comportamiento energético	8,8 seg	719 MB	1,4 seg	75 MB
Paso	Consumo de tiempo: formato Shapefile	Tamaño de los modelos: Shapefile	Consumo de tiempo: formato Geoparquet	Tamaño de los modelos: Geoparquet
B.2 Modelo GIS nacional del parque edificado	13 horas	28,5 GB	4,5 min	2.8 GB
B.3 UBEM nacional basado en CEE	19,4 min	9,5 GB	6,8 seg	487 MB

4.8.2.2. Robustez del modelo

Para verificar la precisión de los resultados del modelo, seleccionamos cuatro indicadores y comparamos los resultados obtenidos con nuestro modelo con los datos nacionales publicados por algunas instituciones oficiales.

Número de edificios, viviendas y bienes inmuebles

La tabla 13 muestra los resultados de los indicadores correspondientes al número de edificios, viviendas y bienes inmuebles.

Tabla 13. Comparación del número de edificios, viviendas y bienes inmuebles entre el modelo basado en CEE a escala nacional y las estadísticas oficiales [214]. Elaboración propia, publicada en [100].

Indicador	UBEM nacional basado en CEE	Datos oficiales	Error relativo
1. N° de edificios	10.934.241	11.130.090	1,8%
2. N° de viviendas	23.690.136	23.238.488	1,9%
3. N° de inmuebles	36.581.505	36.612.402	0,1%

Los datos oficiales muestran un total de 11.130.090 parcelas edificadas, lo que en nuestro modelo se ha denominado edificios. Incluye 10.934.241 edificios, lo que corresponde a una coincidencia del 98,2% con los datos oficiales. La diferencia se debe principalmente a que, al combinar el catastro alfanumérico, actualizado en tiempo real, con el catastro INSPIRE, actualizado cada seis meses, se descartaron los edificios que no están simultáneamente en ambas bases de datos. Adicionalmente, se descartaron algunos casos anómalos que comparten una referencia catastral, como se explicó en los subapartados 4.6.2. y 4.6.3.

Las estadísticas catastrales muestran 23.238.488 viviendas registradas hasta 2019, mientras que nuestro modelo incluye 23.690.136 viviendas, lo que representa un 1,9% más. Esta diferencia se debe a los distintos periodos de tiempo considerados: los datos catastrales corresponden a 2019 y el modelo se basa en datos de 2022.

El catastro registra 36.612.402 bienes inmuebles, mientras que el modelo incluye 36.581.505, con una diferencia del 0,1%. Esta diferencia se atribuye a la combinación de los catastros INSPIRE y alfanumérico, así como a la exclusión de datos anómalos.

Los altos porcentajes de coincidencia en el número de edificios (98,2%), viviendas (98,1%) y bienes inmuebles (99,9%) con los datos oficiales demuestran que el modelo es suficientemente robusto.

Porcentaje de edificios con diferentes clases energéticas

El cuarto indicador corresponde al porcentaje de edificios con diferentes clases energéticas, compuesto por dos subindicadores: CEPNR y emisiones de GEI. La tabla 14 presenta los valores obtenidos con el modelo y los datos oficiales, así como el error absoluto. Cabe destacar que nuestro modelo ofrece resultados para el periodo 2013-2022, mientras que los datos oficiales abarcan el periodo 2013-2020.

El error absoluto medio para todas las clases energéticas en ambos subindicadores es del 0,7%, lo que respalda la robustez del modelo nacional basado en CEE. A pesar de que nuestro modelo no incluye los CEE de ciertas comunidades autónomas y sus datos están actualizados hasta 2022, los resultados coinciden en un 99,3% con los datos oficiales.

Tabla 14. Comparación del porcentaje de edificios con diferentes clases energéticas entre nuestro modelo y los datos oficiales [215]. CEPNR: Consumo de Energía Primaria No Renovable, GEI: Gases de Efecto Invernadero. Elaboración propia, publicada en [100].

Clase energética	CEPNR			Emisiones de GEI		
	UBEM nacional basado en CEE	Datos oficiales	Error	UBEM nacional basado en CEE	Datos oficiales	Error
A	0,5%	0%	0,5%	0,7%	0%	0,7%
B	1,1%	1%	0,1%	1,3%	1%	0,3%
C	3,6%	4%	0,4%	4,8%	5%	0,2%
D	10,0%	11%	1,0%	14,1%	14%	0,1%
E	53,6%	52%	1,6%	56,3%	55%	1,3%
F	11,2%	11%	0,2%	10,3%	11%	0,7%
G	20,0%	21%	1,0%	12,5%	14%	1,5%

4.8.3. Utilidad del modelo

El modelo propuesto ha sido desarrollado con el objetivo de apoyar la definición de trayectorias de rehabilitación por parte de los países europeos, particularmente en el caso de España, según requiere la revisión de la Directiva EPBD de 2024 [63]. Esta directiva establece que los Estados miembros deberán crear una hoja de ruta con objetivos nacionales, indicadores de progreso medibles y plazos específicos. También incluirá la definición de una trayectoria destinada a alcanzar progresivamente clases de rendimiento energético más altas para todos los edificios existentes.

Para explorar la utilidad del modelo, se verificó que es capaz de generar algunos de los indicadores de progreso medibles indicados como obligatorios por la EPBD de 2024.

Dos de los indicadores obligatorios son el uso promedio de energía primaria no renovable en kWh/m² por año y las emisiones anuales de GEI por tipo de edificio. Los datos representados en la figura 22 fueron obtenidos del modelo. En ella se muestra el consumo promedio de energía primaria no renovable y las emisiones de GEI por metro cuadrado y año, en función de la zona climática y el periodo de construcción del edificio.

Para los periodos de construcción, se consideraron los siguientes grupos: anteriores a 1940, 1941-1960, 1961-1980, 1981-2007, 2008-2011 y 2012-2022, tal como se utiliza en la ERESEE [216]. Como se observa en la figura 22, la zona climática tiene una fuerte influencia en el consumo energético. Las áreas más frías

de España, correspondientes a las zonas climáticas D y E, presentan niveles de consumo de energía primaria no renovable y emisiones de GEI un 180% más altos que el resto del país. Por otro lado, se evidencia la mejora gradual de la eficiencia energética en función del año de construcción en todas las zonas climáticas, especialmente en los grupos 2008-2011, coincidiendo con la aprobación del CTE en España, y 2012-2022, con su versión actualizada, que refuerza el compromiso con la eficiencia energética.

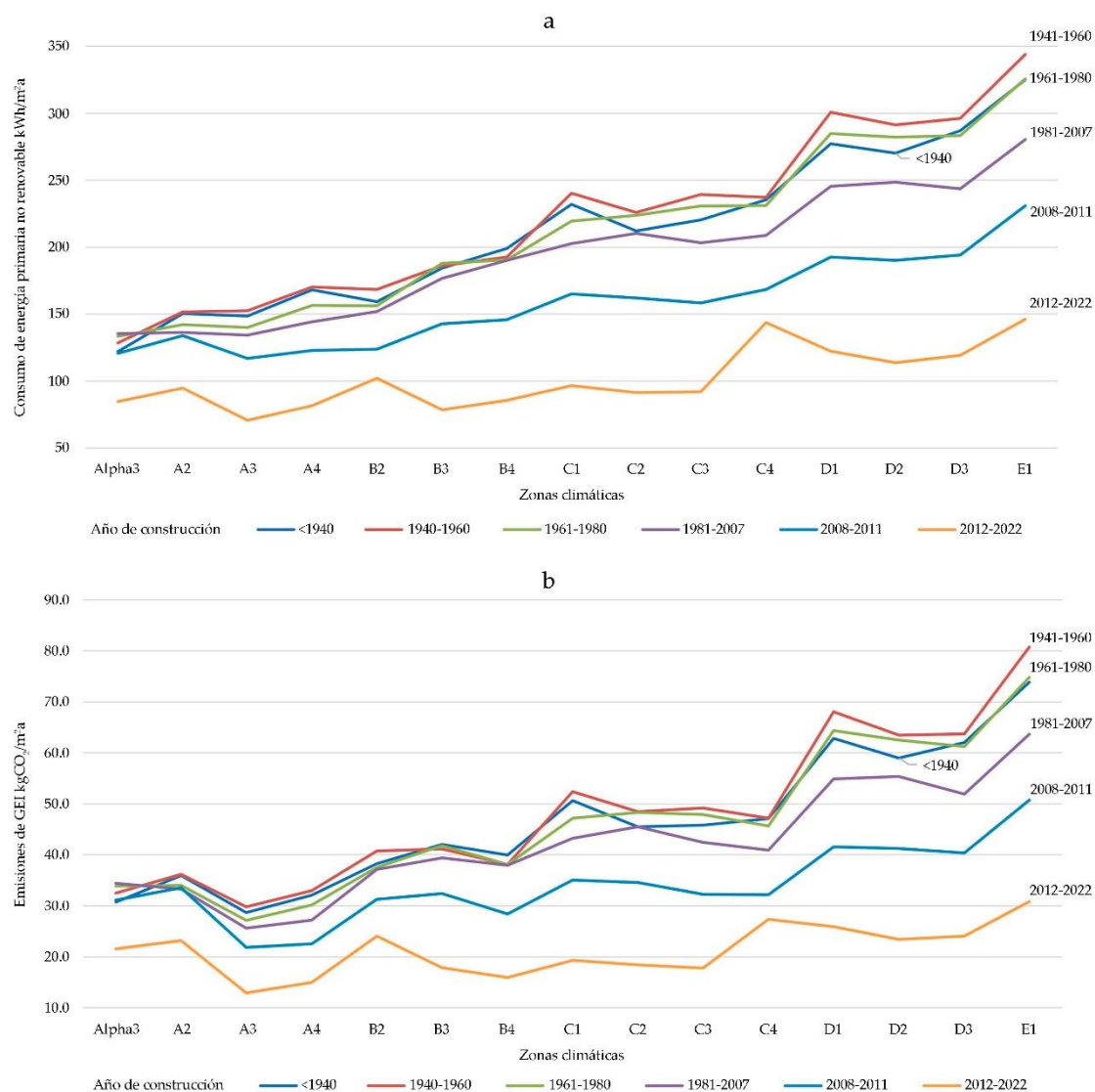


Figura 22. Consumo de energía primaria no renovable (panel superior, a) y emisiones de GEI (panel inferior, b) del parque edificado de España por metro cuadrado, zona climática y año de construcción. Elaboración propia, publicada en [100].

Los ahorros en energía primaria no renovable en el periodo 2012-2022 respecto al periodo anterior a 1940 oscilan entre el 31% y el 59% según la zona climática. Los ahorros en emisiones de GEI varían entre el 30% y el 62%, entre 9

y 43 kgCO₂/m² por año. Las áreas más frías presentan el mayor potencial de ahorro en emisiones.

Por lo tanto, la trayectoria de rehabilitación nacional debería considerar la importancia que tienen las zonas más frías de España en la reducción de emisiones.

Además de por zona climática, nuestro modelo permite extraer los datos de CEPNR y emisiones de GEI de forma geográfica. Por ejemplo, en las figuras 23 y 24 se representa el CEPNR y las emisiones de GEI, respectivamente, del parque edificado residencial y no residencial de España por metro cuadrado y año, en áreas urbanas y rurales, y por CCAA.

En estas figuras, se observa que la distinción entre CCAA y entre áreas urbanas y rurales permite identificar problemas específicos. Por ejemplo, la comunidad con mayor consumo es Castilla y León, mientras que la de menor consumo es Canarias. Además, se aprecia que los edificios situados en áreas rurales tienen, en promedio, un mayor consumo y emisiones por metro cuadrado en el conjunto de España, así como en la mayoría de las CCAA.

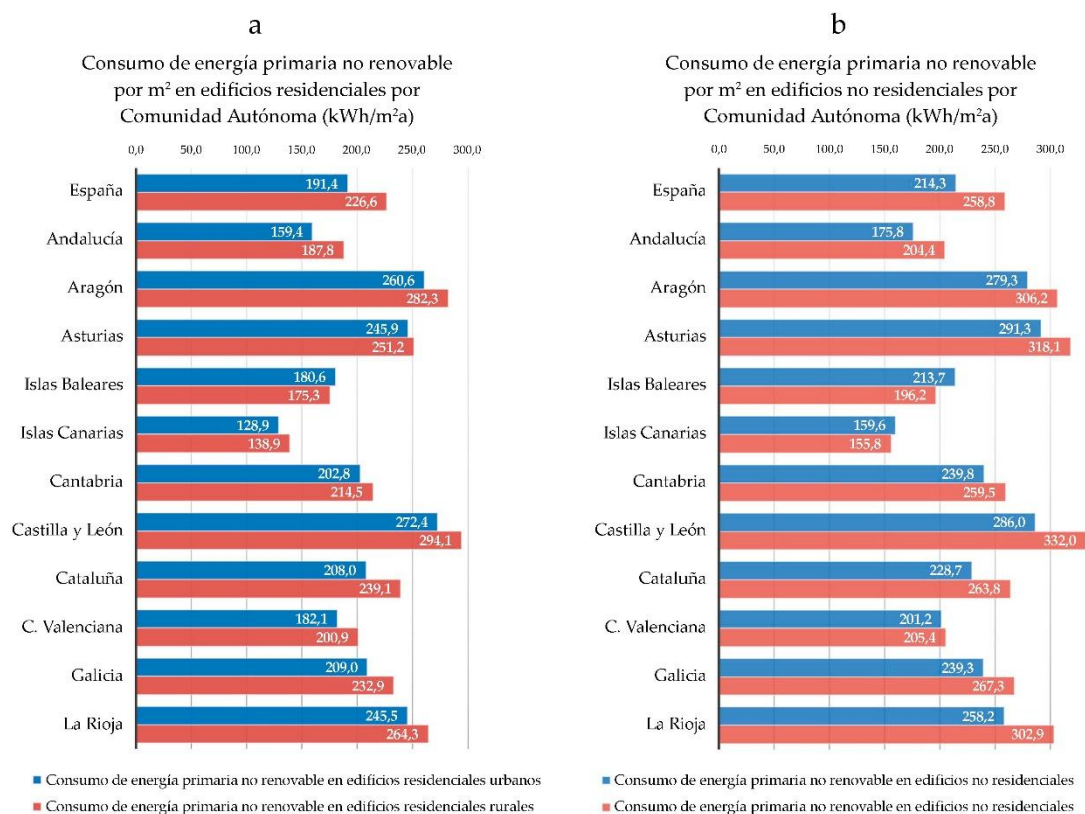


Figura 23. Consumo de energía primaria no renovable del parque edificado residencial (panel izquierdo, a) y no residencial (panel derecho, b) de España, por metro cuadrado y año, en áreas urbanas y rurales, por comunidad autónoma. Elaboración propia, publicada en [100].

En el ámbito residencial, los edificios ubicados en áreas urbanas de España consumen, en promedio, 191,4 kWh/m² por año, mientras que en las áreas rurales el consumo es un 18,4% mayor (figura 23). Respecto a las emisiones promedio de los edificios residenciales, en áreas urbanas estas son de 40,7 kgCO₂/m² por año, y en áreas rurales son un 21,1% superiores (figura 24). En el ámbito no residencial, los edificios ubicados en áreas urbanas consumen, en promedio, 214,3 kWh/m² por año (figura 23) y emiten 45,8 kgCO₂/m² por año (figura 24). En las áreas rurales, el consumo es un 20,8% mayor (figura 23) y las emisiones un 24,7% superiores (figura 24). Estos datos deben ser tenidos en cuenta al establecer prioridades en la trayectoria española de rehabilitación. Las áreas rurales requieren una consideración específica en España.

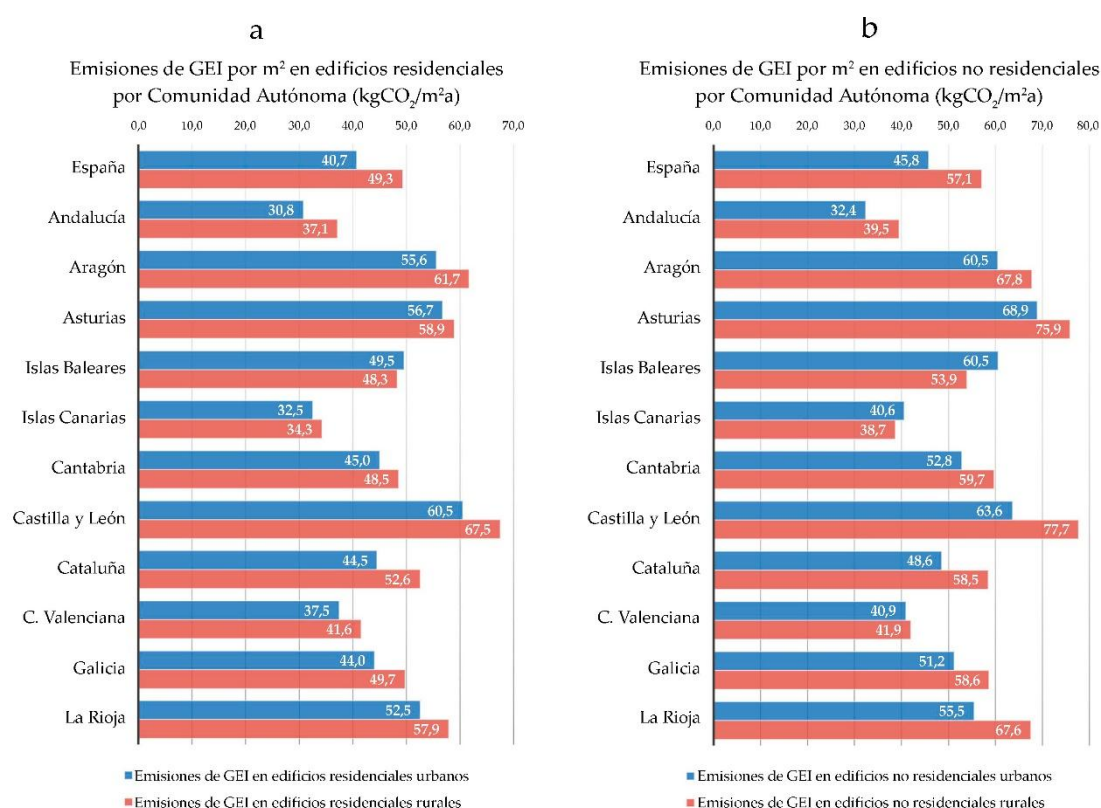


Figura 24. Emisiones de GEI del parque edificado residencial (panel izquierdo, a) y no residencial (panel derecho, b) de España, por metro cuadrado y año, en áreas urbanas y rurales, por comunidad autónoma. Elaboración propia, publicada en [100].

Otros de los indicadores de progreso obligatorios de la revisión de la EPBD de 2024 son el número de CEE por clase energética, por tipo de edificio y el número de edificios y metros cuadrados por clase energética. En la figura 25 se representan el número y porcentaje de CEE, el número y porcentaje de inmuebles certificados, el área certificada y el porcentaje de área certificada, así como el

número y porcentaje de edificios completos certificados, clasificados por clase energética y uso (residencial y no residencial).

Como se observa en la figura 25, el parque edificado de España presenta una distribución muy desigual de las clases energéticas, siendo las clases menos eficientes (E, F y G) las que representan el 80% de los CEE residenciales y el 42% de los no residenciales. La distribución de las clases energéticas por área, inmuebles y edificios completos es bastante similar a la de los CEE en el caso del parque residencial. Sin embargo, para el parque no residencial, la distribución es diferente. El área certificada de los edificios no residenciales con las peores clases energéticas (E, F y G) corresponde al 17% del área certificada. Esto se debe principalmente a que los CEE en las clases energéticas menos eficientes suelen pertenecer a locales comerciales en las plantas bajas de los edificios, que tienen una superficie reducida.

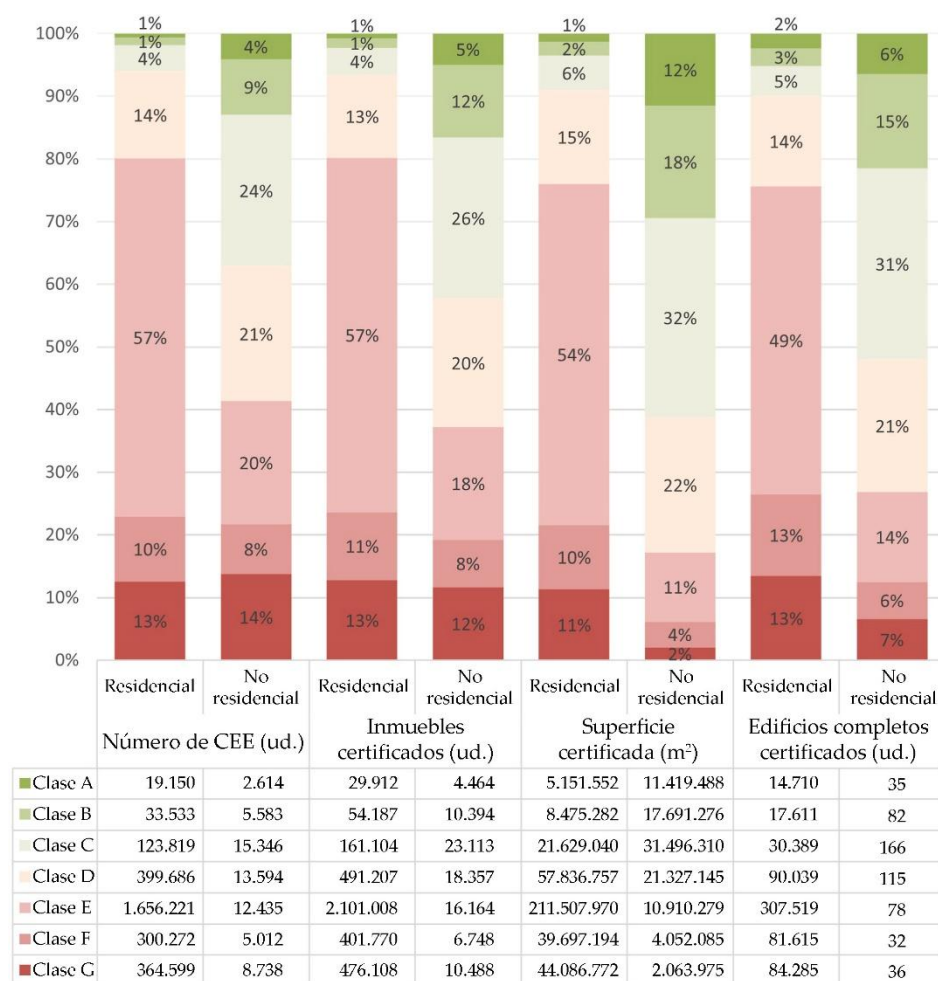


Figura 25. Número y porcentaje de CEE, número y porcentaje de inmuebles certificados, área certificada y porcentaje de área certificada, y número y porcentaje de edificios completos certificados, clasificados por clase energética y uso. Elaboración propia, publicada en [100].

También se observa que hay más edificios certificados en su totalidad con mejor rendimiento energético que inmuebles, tanto en el parque residencial como en el no residencial (figura 25). Esto se explica porque los edificios nuevos suelen certificarse en su conjunto con mayor frecuencia cuando se venden, en comparación con los edificios más antiguos, que se certifican con más frecuencia para bienes inmuebles individuales cuando se alquilan.

Todos estos datos evidencian el alto grado de representación de los segmentos con peor desempeño energético en España, especialmente en el parque residencial, y el gran desafío que enfrenta el país para descarbonizar su parque edificado. La trayectoria de rehabilitación en España debería centrarse en los segmentos más desfavorecidos, en particular en el uso residencial.

4.9. Discusión y conclusiones

Hasta el momento, los UBEM a escala nacional se han generado basándose en arquetipos y simulaciones. Este tipo de modelos han demostrado ser útiles para estimar el consumo energético de los parques edificados nacionales [25] [217]. Sin embargo, su principal limitación radica en que requieren el uso de supercomputadoras, debido a las simulaciones energéticas realizadas a gran escala, lo que limita su generación y diseño. Esto sumado a la falta de datos nacionales, les hace necesario aproximar los edificios clasificándolos en arquetipos, lo que implica una simplificación que subestima la variabilidad del comportamiento energético.

En este capítulo se demuestra que es posible generar un nuevo tipo de UBEM a partir de CEE, datos catastrales y otras fuentes de datos abiertos, superando las limitaciones asociadas al uso de arquetipos y simulaciones. Además, este modelo presenta la ventaja de que los datos pueden ser actualizados automáticamente, en un corto período de tiempo y con recursos informáticos simples. El reducido tiempo de cálculo de nuestro modelo se debe a que no se realizan simulaciones energéticas, sino que se reutilizan las incluidas en los CEE, aprovechando las simulaciones detalladas ya realizadas por técnicos. Este nuevo UBEM se basa en GIS, cuya conectividad e interoperabilidad permiten la reutilización, combinación y georreferenciación de datos provenientes de diversas fuentes, lo que posibilita el cruce de información existente sobre los edificios de manera individualizada para llevar a cabo estudios energéticos avanzados del parque edificado y definir futuras trayectorias para su rehabilitación energética.

Aunque los CEE requieren una detección significativa de valores atípicos, como se ha observado en el caso de estudio de España, tienen la ventaja de proporcionar acceso a un gran número de simulaciones energéticas realizadas de manera detallada y edificio por edificio por técnicos especializados. Además, cabe destacar que el potencial de los CEE está creciendo debido al incremento en

el número de certificados disponibles en abierto (figura 26). Hasta el 1 de enero de 2023, en España existen 3.920.354 CEE con datos abiertos.



Figura 26. Número de CEE disponibles cada año en las bases de datos abiertas en España.
Elaboración propia, publicada en [100].

4.9.1. Limitaciones del modelo

El modelo generado presenta algunas limitaciones, la mayoría de las cuales derivan de la falta de datos y la heterogeneidad en la forma de proporcionarlos de las fuentes utilizadas. Cada país enfrentará sus propias limitaciones en función de las características de los datos disponibles. Las limitaciones específicas para el caso de España se enumeran a continuación:

- Ausencia de datos de propiedad en el catastro INSPIRE y el catastro alfanumérico. Por motivos de protección de datos personales, no se incluyen referencias sobre la titularidad de los edificios. Como consecuencia, no es posible incorporar información sobre el tipo de propiedad (privada o pública) para cada edificio. Esta información sería útil para realizar análisis energéticos avanzados de edificios públicos y privados por separado y para definir trayectorias de rehabilitación diferenciadas para cada caso. Sería deseable que el catastro pudiera proporcionarla con fines de investigación. Sin embargo, cabe destacar que, en el caso de España, las viviendas de titularidad pública representan solo el 1,5% del total [218], por lo que el modelo se considera válido para el diagnóstico de las viviendas privadas y el diseño de su trayectoria lineal.
- Baja proporción de edificios certificados. Actualmente, el porcentaje de edificios certificados es bajo (12,93%) en comparación con el total existente. Sin embargo, como se observa en la figura 26, el número de

CEE aumenta significativamente cada año. Esto, sumado al hecho de que las directivas europeas siguen apoyándose en el CEE como una de las principales herramientas para fomentar y concienciar sobre la importancia del comportamiento energético de los edificios en la ciudadanía, conlleva que este tipo de modelo se alimentará de una cantidad creciente de datos en el futuro. Los datos en el apartado 4.8.3, distinguiendo por zonas urbanas y rurales, resultan fiables ya que son datos a escala de Comunidad Autónoma, escala que está ampliamente cubierta por los datos existentes, sin embargo, si se descendiese a escalas menores como puede ser la de municipio puede no haber suficientes para dar unos resultados completos en los municipios rurales de menor tamaño debido a la falta de CEE. Conforme avance la certificación energética del parque edificado, los modelos al ser automáticos se pueden ir generando con la nueva información disponible y conforme se certifique el parque edificado esta brecha de falta de certificados entre predios rurales y urbanos se irá reduciendo.

- Falta de publicación abierta en algunas CCAA. Algunas comunidades autónomas de España aún no publican abiertamente los datos de los CEE. No obstante, se sabe que la EPBD de 2024 especifica que las bases de datos de CEE deben ser de acceso público, legibles por máquinas, accesibles mediante una interfaz digital e interoperables con bases de datos administrativas, como el catastro o el *Digital Building Logbook* (DBL). Por lo tanto, se espera que, en un futuro próximo, todas las CCAA hagan estos datos accesibles públicamente.
- Simulación energética frente al consumo real. Los CEE se basan en simulaciones energéticas y no estiman con precisión el consumo energético real de los edificios. Esto se debe, entre otras cuestiones, a que factores como el comportamiento del usuario influyen en el consumo energético real [219]. Sin embargo, aunque esto es cierto, los certificados energéticos representan un método homogéneo para evaluar el parque edificado y asignar, por ejemplo, consumos a viviendas que, debido a la pobreza energética, no los tendrían en la práctica. Por esta razón, consideramos que el uso de CEE es adecuado para el diseño de trayectorias de rehabilitación, ya que permiten evaluar los edificios existentes con criterios homogéneos de eficiencia energética, detectando los casos con peor comportamiento sin quedar ocultos por factores relacionados con el comportamiento del usuario.
- Falta de homogeneización de los datos de los CEE. La falta de uniformidad en los datos publicados por las diferentes CCAA de España constituye una barrera significativa para un uso más amplio. Por ello, recomendamos estandarizar los datos publicados y su formato.

4.9.2. Conclusiones

En este capítulo se ha definido una metodología para construir un UBEM basado en CEE y otros datos en abierto a escala nacional. Este modelo automatizado utiliza datos abiertos de fuentes establecidas a nivel europeo a través de directivas (CEE, catastro INSPIRE y MDT), junto con otros datos abiertos nacionales (catastro alfanumérico, legislación y estadísticas nacionales). El objetivo es crear una única base de datos GIS útil tanto para el diagnóstico energético del parque edificado nacional como para establecer trayectorias de rehabilitación a nivel europeo y calcular los indicadores de progreso para poder medir sus avances.

El modelo ha demostrado ser capaz de construirse y actualizarse automáticamente. Los procesos automatizados de generación del modelo requirieron un tiempo total inferior a seis horas para todo el territorio de España, utilizando un ordenador estándar. El modelo permite mapear y analizar los edificios del país integrando múltiples variables de distinta naturaleza, como geográficas, físicas, relacionadas con el uso y con la energía.

La robustez del modelo se ha probado mediante cuatro indicadores, verificándose que los resultados coinciden en más del 98% con los datos oficiales.

Para evaluar la utilidad del modelo, se han desarrollado algunos de los indicadores que la directiva EPBD de 2024 establece como obligatorios. A través de su uso se ha identificado que las áreas en España con inviernos fríos (zonas climáticas D y E) tienen una alta relevancia en la descarbonización del parque edificado nacional, dado que presentan niveles de CEPNR y emisiones de GEI un 180% más altos que en otras zonas climáticas. Asimismo, se ha observado que los edificios en zonas rurales tienen consumos superiores (18,4% en edificios residenciales y 20,8% en no residenciales) y también mayores emisiones (21,1% en edificios residenciales y 24,7% en no residenciales). Finalmente, se detectó que el parque residencial en España requiere una mejora energética significativa, ya que el 75% de la superficie residencial certificada energéticamente pertenece a las clases energéticas menos eficientes (E, F y G).

Estos datos, que no estaban disponibles en España antes de la generación de este modelo, junto con muchos otros que pueden ser generados, demuestran la utilidad del modelo desarrollado. El modelo es útil para el diagnóstico del parque edificado nacional y para el diseño de las hojas de ruta de la rehabilitación. Jiménez Solana [220] señala que, con este tipo de modelos, los datos podrían incluso reutilizarse para estimar la eficiencia energética de todo el parque edificado nacional, de manera similar a los procedimientos de valoración catastral masiva, sin coste alguno para la ciudadanía. En el siguiente capítulo se desarrollará cómo incorporar una estimación de la eficiencia energética de los edificios que aún no poseen un CEE.

**Predicción del comportamiento
energético del parque edificado sin
certificar: modelo nUBEM**

El capítulo 5 es una versión extendida y actualizada de las siguientes publicaciones:

- Beltrán Velamazán, C.; Monzón Chavarrías, M.; López Mesa, B. Predicting Energy and Emissions in Residential Building Stocks: National UBEM with Energy Performance Certificates and Artificial Intelligence. *Applied Sciences* **2025**, *15*, 514. <https://doi.org/10.3390/app15020514>.
- Beltrán Velamazán, C.; Gómez Gil, M.; Monzón Chavarrías, M.; Espinosa Fernández, A.; López Mesa, B. Harnessing Open European Data for a Data-Driven Approach to Enhancing Decarbonization Measurement in the Built Environment. *Environmental and Climate Technologies* **2024**, *28*, 776–793. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2024-0060>.

El código en Python desarrollado para generar el modelo está disponible en Zenodo (versión 1.0.0) y es mantenido en el GitHub:

- Beltrán Velamazán, C.; Monzón Chavarrías, M.; López Mesa, B. *nUBEM: National UBEM with Energy Performance Certificates and Artificial Intelligence (1.0.0)*. Zenodo 2025. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14524563>.
- Beltrán Velamazán, C.; Monzón Chavarrías, M.; López Mesa, B. *GitHub - nUBEM: National UBEM with Energy Performance Certificates and Artificial Intelligence*. Disponible en: <https://github.com/CarlosBeltranVelamazan/nUBEM>.

5. Predicción del comportamiento energético del parque edificado sin certificar: modelo nUBEM

En el capítulo anterior se mostraba la capacidad de generar un modelo UBEM a escala nacional basado en los datos en abierto disponibles. Este modelo posee un gran potencial, pero tiene la limitación de que abarca aproximadamente el 13% de los edificios en España. Fundamentalmente debido a la falta de información de los edificios sin Certificado de Eficiencia Energética (CEE) y que todavía quedan registros de CEE que no ofrecen sus datos en abierto, lo que limita los resultados y el alcance que se puede obtener.

Este capítulo presenta el diseño de una metodología que aborda este desafío. Se va a desarrollar el potencial de nuevas tecnologías como el *Machine Learning* (ML) para entrenar un algoritmo capaz de predecir el comportamiento energético de los edificios, de forma que aprendiendo sobre los datos disponibles en abierto se pueda conocer el estado del parque edificado nacional en su conjunto, generando un modelo UBEM a escala nacional que abarque todos los edificios existentes del país.

Con este enfoque, se espera no solo mejorar el alcance y la precisión de los UBEM a escala nacional, sino también ofrecer una herramienta útil para que las administraciones y los responsables de políticas públicas puedan diseñar e implementar medidas más eficientes y efectivas en el contexto de la transición energética y la descarbonización del parque edificado.

5.1. Objetivo: Uso del ML para extender la información al total de los edificios de España

En la UE los EM se han comprometido a lograr la neutralidad climática para el año 2050 [36]. Una de las estrategias más ambiciosas para alcanzar este objetivo es la rehabilitación del parque edificado existente, ya que los edificios representan el 40% del consumo de energía y el 36% de las emisiones de GEI [63]. La UE ha lanzado iniciativas como la *Renovation Wave* [221] y la reformulación de la Directiva EPBD de 2024 [63], con el fin de acelerar la rehabilitación de los edificios existentes en toda Europa.

Para diseñar de manera eficaz las políticas relativas al rendimiento energético de los edificios, la reformulación de la Directiva EPBD de 2018 [53] obliga a los EM a desarrollar indicadores de progreso que midan los avances

hacia la descarbonización. La lista de indicadores es extensa y abarca una amplia gama de aspectos, incluyendo, entre otros, las características generales y el rendimiento energético del parque edificado nacional, el estado de las rehabilitaciones profundas, los segmentos con peor rendimiento, las propiedades en régimen de alquiler, la pobreza energética, las capacidades de la industria de la construcción, el ahorro energético real, los beneficios más amplios de las rehabilitaciones de edificios, el ahorro energético estimado, la reducción de costos asociados a éstas, así como las políticas y medidas para movilizar inversiones en la rehabilitación de edificios [9].

Medir estos indicadores es crucial para optimizar estrategias nacionales de rehabilitación basadas en datos y demostrar a la UE el uso eficaz de los fondos europeos destinados a la descarbonización del entorno construido. Sin embargo, los enfoques actuales no permiten medir muchos de los indicadores de progreso requeridos [30], lo que hace necesaria la creación de nuevas herramientas que proporcionen datos útiles y fiables comparables entre los países europeos [11]. Esta deficiencia de datos es una barrera importante identificada por los EM en sus estrategias nacionales [69]. Tecnologías como la georreferenciación, el análisis de Big Data y el ML representan una excelente oportunidad para desarrollar estas herramientas. Como se detalla en el capítulo 3, una parte significativa de los 71 indicadores de progreso propuestos en la Recomendación de la Comisión de 2019 [54] no pueden desarrollarse adecuadamente en España. En concreto, el 42% de los indicadores no pueden ser recopilados actualmente, y el 41% solo pueden obtenerse de forma parcial debido a la falta de fuentes de información y los enfoques de recopilación de datos actuales. Las nuevas tecnologías ofrecen una gran oportunidad para calcular algunos de los indicadores faltantes tanto en España como en todos los países de la UE.

Estas nuevas tecnologías dependen de los datos. Para lograr su máxima utilidad, estos deben:

- Ser comunes entre todos los Estados Miembros (EM) para facilitar la cooperación y la comparabilidad entre los países europeos.
- Ser abiertos para permitir la automatización y actualizaciones constantes. Esto es fundamental para realizar análisis de forma continua en el tiempo y evaluar el progreso de la descarbonización del parque edificado, algo que no permiten los estudios realizados de forma puntual.

Sin embargo, la generación de estos indicadores se enfrenta a varias barreras debido a las características de los datos:

1. Fragmentación de datos y falta de interoperabilidad. Los datos a menudo se recopilan a nivel regional o municipal sin un formato común, lo que dificulta su combinación para crear información a gran escala [32].

2. Estructuras de datos dispares. Los datos recopilados de diversas fuentes se presentan en formatos incompatibles, carecen de API para el acceso directo, lo que complica el análisis a gran escala. Algunos datos se proporcionan en formatos no legibles por máquinas, lo que impide la automatización [96].
3. Dificultad de acceso a los datos. Gran parte de la información no es abierta y requiere solicitudes, lo que bloquea la automatización y actualización constante [100].
4. Errores de etiquetado y datos incompletos. La información a veces está incompleta o contiene errores que necesitan filtrado o corrección [33].

Como resultado, estas barreras limitan significativamente la capacidad de los EM para recopilar y utilizar datos esenciales para una toma de decisiones efectiva [11]. Para abordar estos problemas y obtener una cantidad y con una calidad de datos suficiente, la UE ha lanzado varias directivas y propuestas, como la Directiva INSPIRE [20], la Directiva (UE) 2019/1024 [102] y la Ley de Datos [21]. Estas directivas tienen como objetivo mejorar el acceso y el uso de los datos dentro de la UE, creando un espacio interoperable común y seguro en la Unión Europea. Como se discute en [80], el uso de grandes datos abiertos provenientes de fuentes de información pública, dentro de marcos interoperables establecidos por estas directivas, permite análisis a gran escala y se beneficia de la georreferenciación y la interrelación de datos para monitorizar el progreso de la descarbonización y las condiciones de los edificios, entre otras ventajas.

En el capítulo 3 se han descrito los diferentes tipos de UBEM que existen y cómo son las metodologías para generarlos, en este capítulo el modelo que se desarrolla pertenece a la finalidad de UBEM para estrategias de reducción de carbono a nivel de parque edificado, al igual que el modelo del capítulo 4. El modelo de este capítulo se genera siguiendo la metodología híbrida, es decir, combinando la metodología basada en CEE con ML para poder avanzar en el conocimiento sobre el parque edificado.

Este modelo se va a denominar Modelo Nacional de Energía de Edificios Urbanos potenciado por IA (nUBEM). Es un UBEM a escala nacional que permite obtener ciertos indicadores de progreso requeridos por la revisión de la EPBD de 2024, útiles para generar información valiosa para el desarrollo de estrategias de descarbonización a gran escala y que facilita la toma de decisiones políticas basadas en datos.

Este modelo supone una mejora sustancial respecto al del capítulo 4, que se generaba caracterizando el rendimiento energético de los edificios con CEE. Sin embargo, solo podía proporcionar datos energéticos para edificios con CEE, que en España representan el 13% de los edificios existentes.

En este capítulo el objetivo es proponer una metodología híbrida, aprovechando el potencial que ofrece la IA, para generar un modelo mejorado

respecto al modelo basado en CEE y datos en abierto descrito en el capítulo 4 y evaluarlo en comparación con otros existentes en la literatura científica.

La metodología que se propone es potencialmente aplicable a todos los usos certificables. Sin embargo, la falta de datos actual sobre certificados de eficiencia energética de los usos no residenciales, junto con la alta variabilidad de los requisitos de consumo de energía dentro de una misma categoría, por ejemplo, en los usos culturales, sanitarios o comerciales, que presentan necesidades energéticas muy dispares, dificulta la fiabilidad de los resultados. Por este motivo, la tesis decidió centrarse en el sector residencial para el desarrollo del modelo predictivo.

Entrenado con el modelo anterior, este abarca todo el parque residencial de España, ofreciendo una solución óptima para proporcionar información sobre el rendimiento energético residencial de todo el parque edificado, al mismo tiempo que garantiza un consumo eficiente de recursos.

El modelo mejorado incorpora técnicas geoespaciales para enriquecer los datos existentes y algoritmos de inteligencia artificial para predecir el rendimiento energético de todos los edificios residenciales de un país. Dado que se crea utilizando datos abiertos de fuentes de información pública establecidas a través de directivas europeas, puede aplicarse a todos los Estados Miembros de la UE que hayan incorporado los marcos de datos establecidos por estas directivas.

5.2. Propuesta de una metodología basada en Machine Learning (ML) para abarcar todos los edificios de España

Se desarrolla la metodología para combinar el UBEM a escala nacional, basado en los CEE presentado en el capítulo anterior, con técnicas de ML, creando un UBEM híbrido tal y como se definió en la sección '3.3.5.2. Estado del arte de los UBEM'. La metodología empleada consta de siete pasos:

1. Selección del caso de estudio
2. Recopilación preliminar de datos
3. Adición de variables geoespaciales
4. Selección del algoritmo
5. Entrenamiento y prueba de los modelos
6. Validación del modelo
7. Aplicabilidad del mismo

5. Predicción del comportamiento energético del parque edificado sin certificar: modelo nUBEM
- 5.2. Propuesta de una metodología basada en Machine Learning (ML) para abarcar todos los edificios de España
-

5.2.1. Selección del caso de estudio

Para desarrollar este modelo, se ha seleccionado como caso de estudio el parque de edificios residenciales en España. Se considera un caso de estudio adecuado, ya que cuenta con datos abiertos disponibles a nivel de edificio, provenientes de múltiples fuentes de información en cantidad suficiente. Además, estas fuentes de información, que se detallan en los subapartados 3.3.2. y 3.3.3., están basadas en directivas europeas con lo que existen fuentes de datos análogas en los países europeos, lo que permite extrapolar los hallazgos a otros países de la UE.

5.2.2. Recopilación preliminar de datos

Con base en el modelo basado en CEE y datos en abierto, se van a enriquecer los datos disponibles añadiendo más características geoespaciales al modelo y a entrenar una IA que permita realizar predicciones sobre la información faltante. Los datos de entrada utilizados son aquellos existentes y válidos a fecha de 1 de enero de 2024.

El modelo anterior contiene los datos geográficos y físicos de todos los edificios en España disponibles en el catastro, excluyendo las CCAA de Navarra y el País Vasco, que tienen sus propios sistemas catastrales. También incluye la información energética de todos los edificios con al menos un CEE disponible en las bases de datos abiertas publicadas por las regiones de España. Los CEE proporcionan información sobre el rendimiento energético de los edificios, en particular el Consumo de Energía Primaria No Renovable (CEPNR) en kWh/(m²año) y las emisiones de GEI en kgCO_{2eq}/(m²año).

A fecha de 1 de enero de 2024, España, excluyendo Navarra y el País Vasco, cuenta con 11 millones de edificios existentes, de los cuales 8,7 millones son residenciales, y 1,2 millones de ellos tienen datos abiertos de CEE. Por lo tanto, se dispone de datos de rendimiento energético para el 13,8% de los edificios residenciales existentes. Esta cifra es ligeramente superior al 12,9% de los edificios totales existentes, ya que el parque residencial conforma la mayor parte de los edificios certificados totales.

Dado que el objetivo es entrenar un modelo capaz de predecir el CEPNR y las emisiones de GEI de todos los edificios residenciales del país, se utilizarán los datos de rendimiento energético y las características físicas de los edificios para entrenar el algoritmo.

Para garantizar la aplicabilidad del modelo, este emplea información de otras fuentes accesibles para todos los edificios de España como datos de entrada, los cuales servirán para aprender los patrones del CEPNR y las emisiones de GEI de

los CEE. De los CEE en abierto, solo se utilizan las variables objetivo a predecir, el CEPNR y las emisiones de GEI. De esta forma el modelo aprende de los edificios certificados cómo son las relaciones entre las variables físicas y geográficas y los CEPNR y emisiones de GEI, y luego, una vez aprendidas estas relaciones es capaz de realizar predicciones sobre el resto de los edificios del parque edificado empleando los datos físicos y geográficos.

Los pasos relacionados con el preprocesamiento de los datos, la extracción de características y la detección de valores atípicos ya se han desarrollado en la base de datos de entrada, como se detalla en el capítulo anterior y en [100]. Mediante la referencia catastral es posible vincular la información disponible sobre un edificio de diferentes fuentes de información. Estos datos se utilizarán para entrenar el modelo y relacionar sus características físicas con su rendimiento energético (figura 27).

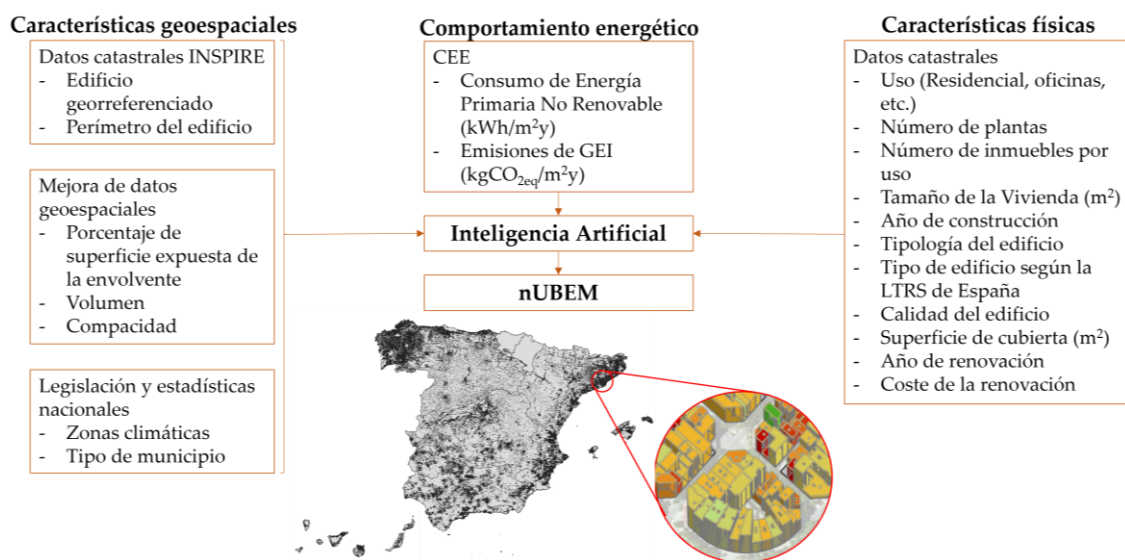


Figura 27. Esquema de funcionamiento del modelo. Los datos obtenidos de diversas fuentes, vinculados en este estudio mediante la referencia catastral se combinan para entrenar una IA.
Elaboración propia, publicada en [162].

5.2.3. Adición de variables geoespaciales

Para generar predicciones más precisas, se han añadido varias características geoespaciales a los datos. Como se describe en Xie et al. [222], es posible mejorar nuestra comprensión de los edificios utilizando tecnologías que enriquecen datos geoespaciales más simples. Esta información geoespacial se obtiene a partir de datos GIS 2D y datos alfanuméricos del Catastro, mediante programación se

combina la información disponible para obtener las siguientes características de los edificios:

5.2.3.1. Fachadas y medianeras

Una característica importante es la diferenciación entre las superficies del edificio en contacto con el aire exterior (fachadas) y las superficies en contacto con elementos adiabáticos (medianeras). El área de superficie en contacto entre edificios se calcula en GIS, conociendo la geometría de la planta del edificio y su número de pisos, datos que se obtienen del Catastro de España. Para este cálculo se asigna una altura de piso estándar de 3 metros, siguiendo la metodología desarrollada en [223]. Para un mejor entrenamiento de los modelos de aprendizaje automático, estos datos se expresan como un porcentaje del área de la fachada respecto a la total de la envolvente.

5.2.3.2. Compacidad

Conociendo la geometría de la planta del edificio y el número de pisos, se calculan los metros cuadrados de la envolvente y los metros cúbicos de volumen. La compacidad se calcula de acuerdo con la legislación española [180], considerando toda la envolvente en contacto con el aire exterior y el suelo, y excluyendo el área de la medianera. La fórmula utilizada es la ecuación (1):

$$eq(1) \text{ Compacidad} = \frac{V}{\sum A_i} \text{ m}^3/\text{m}^2$$

Donde:

V = Volumen encerrado por la envolvente energética

A_i = Área de la envolvente en contacto con el aire exterior o el suelo

5.2.4. Selección del algoritmo de IA

Se han empleado seis técnicas de aprendizaje automático supervisado para predecir el rendimiento energético de los edificios:

- **Modelo lineal generalizado (*Generalized Linear Model*):** Es un marco estadístico que generaliza la regresión lineal para manejar diversas distribuciones de datos mediante la incorporación de funciones de enlace y con la varianza de cada medición como una función de su valor predicho. Permite trabajar con datos no distribuidos normalmente y ofrece una modelización flexible de las relaciones entre variables.

- Aprendizaje profundo (*Deep Learning*): El aprendizaje profundo utiliza redes neuronales con múltiples capas para identificar patrones complejos en los datos. Estas redes emplean algoritmos de retropropagación para ajustar los pesos de manera iterativa, optimizando el rendimiento del modelo mediante descenso de gradiente en representaciones de datos de alta dimensionalidad, situaciones en las que los datos poseen un gran número de variables o características.
- Árboles de decisión (*Decision Tree*): Los árboles de decisión dividen recursivamente el espacio de características en función de sus valores para generar predicciones. Seleccionan divisiones que maximizan la ganancia de información o minimizan las imprecisiones, lo que da lugar a modelos interpretables capaces de capturar relaciones no lineales en los datos.
- Bosque aleatorio (*Random Forest*): Son una combinación de árboles de decisión que dependen de los valores de un vector aleatorio independiente y con la misma distribución para todos los árboles. Al promediar o votar sobre las predicciones individuales, este método reduce el sobreajuste y mejora la robustez, siendo adecuado para conjuntos de datos de alta dimensionalidad.
- Árboles potenciados por gradiente (*Gradient Boosted Trees*, GBT): Los GBT construyen un conjunto de árboles de decisión de manera secuencial, donde cada árbol se enfoca en reducir los errores de sus predecesores. Optimiza una función de pérdida diferenciable utilizando descenso de gradiente, lo que posibilita predicciones altamente precisas mediante un refinamiento iterativo del modelo.
- Máquinas de vector soporte (*Support Vector Machine*, SVM): Las SVM construyen un hiperplano óptimo en un espacio de alta dimensionalidad para separar las clases, maximizando el margen entre ellas. Emplean funciones kernel para mapear los datos a espacios de mayor dimensionalidad, lo que permite clasificar datos linealmente inseparables con sólidas garantías teóricas.

Los algoritmos se seleccionaron para representar una amplia gama de enfoques de aprendizaje automático, garantizando una evaluación integral de varios de los algoritmos de predicción más utilizados. Se probaron diversos algoritmos para encontrar la solución óptima a este problema.

Para las seis técnicas, se implementó un sistema de búsqueda en rejilla (*grid search*), probando diferentes combinaciones de hiperparámetros, parámetros que controlan el comportamiento del algoritmo y que no se aprenden directamente de los datos, para determinar la configuración que mejor se ajustara a los

requisitos del modelo ya que su ajuste es decisivo para mejorar la precisión y generalización del modelo. Los resultados obtenidos para cada técnica se detallan en el subapartado 5.3.1.

5.2.5. Entrenamiento y prueba de los modelos

Para el entrenamiento del modelo, se utilizó Python 3.12.0 y XGBoost 2.0.3 [224]. XGBoost es una biblioteca optimizada de gradient boosting que construye conjuntos de árboles de decisión para resolver de manera eficiente tareas de clasificación y regresión, esta técnica está incluida en las técnicas de aprendizaje supervisado. Un aspecto clave del entrenamiento del modelo es mitigar el sobreajuste (*overfitting*) y el subajuste (*underfitting*). Para abordar el underfitting, XGBoost permite controlar la complejidad del modelo mediante parámetros como la profundidad máxima de los árboles y el número de rondas de boosting. Para prevenir el overfitting, incorpora mecanismos como la regularización, el peso mínimo de los nodos hoja (*minimum child weight*) y el muestreo aleatorio de datos y características. Estas estrategias reducen efectivamente la complejidad del modelo y mejoran su capacidad de generalización.

El algoritmo fue calibrado y se empleó la técnica de validación cruzada (*cross-validation*), se divide la base de datos del modelo anterior, todos los edificios con CEE en abierto, en subconjuntos de entrenamiento y de prueba, generando un modelo con el 90% de los datos y probándolo con el 10% restante. Esto implica que, de forma alternada en 10 subgrupos, todos los datos fueron usados para probar el modelo, obteniendo datos de validación más robustos y evitando el overfitting y underfitting. Este procedimiento se llevó a cabo de manera análoga a [146]. Las variables objetivo a predecir son la información energética, el CEPNR en kWh/(m²año) y las emisiones de GEI en kgCO_{2eq}/m²año, utilizando como variables predictoras la información geográfica y física.

Datos utilizados:

- Información energética
 - CEPNR (kWh/m²año)
 - Emisiones de GEI (kgCO_{2eq}/m²año)
- Características físicas
 - Uso (residencial, oficinas, etc.)
 - Número de pisos
 - Número de inmuebles por uso
 - Tamaño de la vivienda (m²)
 - Año de construcción
 - Tipología del edificio (unifamiliar, bloque lineal, manzana cerrada, etc. organizada según la clasificación de [130])

- Tipo de edificio según las Estrategias a Largo Plazo de Renovación de España (LTRS)
- Calidad de la construcción
- Superficie de cubierta (m²)
- Año de reforma o rehabilitación
- Coste de la reforma o rehabilitación
- Tipo de municipio (urbano o rural)
- Características geográficas
 - Edificio georreferenciado
 - Perímetro del edificio
 - Zona climática
 - Porcentaje de superficie expuesta de la envolvente
 - Volumen
 - Compacidad

5.2.6. Validación del modelo

Validar adecuadamente el modelo UBEM generado es un punto crítico para poder garantizar que cumplan con sus objetivos previstos. Actualmente, no existe un consenso en la literatura sobre qué indicadores o valores son aceptables al evaluar un UBEM, lo que resulta en una gran variabilidad de los valores de precisión considerados aceptables.

Ramos Ruiz et al. [225] estudian la validación de modelos energéticos, destacando que los indicadores más utilizados en la literatura son el Error Medio Normalizado de Sesgo, conocido por su nombre y siglas en inglés *Normalized Mean Bias Error* (NMBE), el Coeficiente de Variación del Error Cuadrático Medio, conocido como *Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error* (CV(RMSE)) y el Coeficiente de Determinación, *Coefficient of Determination* (R²)⁶. El estudio hace referencia a la Guía ASHRAE como el principal estándar en el campo. Oraiopoulos et al. [161] evalúan la precisión de diferentes UBEM, tanto para edificios individuales como para conjuntos de edificios, basándose en NMBE, CV(RMSE) y R², encontrando precisiones de UBEM que van desde NMBE -15% a +4% y CV(RMSE) entre 3% y 50%, con valores de CV(RMSE) agregados de 10-20%.

La Guía ASHRAE 14-2014 *Measurement of Energy, Demand, and Water Savings* [226] utiliza NMBE y CV(RMSE) para validar modelos, considerando resultados aceptables a escala mensual con NMBE de $\pm 5\%$ y CV(RMSE) $< 15\%$. Sin embargo, la Guía ASHRAE aplica esta validación a modelos a escala distrito, categorizados como 'UBEM para recomendaciones a nivel de edificio' según la clasificación de Ang et al. [151], en la cual cada tipo de modelo requiere diferentes niveles de

⁶ Se utilizarán las denominaciones en inglés debido a su uso generalizado.

precisión. Como se indica en [161] la precisión de los edificios agregados a menudo supera los valores recomendados por ASHRAE, mientras que la precisión de edificios individuales, especialmente el CV(RMSE), tiende a ser más alta.

A escala nacional, Bass et al. [33] estudian la precisión de simulación utilizando el software AutoBEM para crear un UBEM a escala nacional en Estados Unidos con OpenStudio y EnergyPlus, validando el modelo mediante el Error Mediano (MdE) y R². Lograron un R² de 0,069 debido a una alta dispersión del modelo y errores medianos de -3% en el uso residencial, lo que indica un equilibrio entre la sobreestimación y la subestimación.

Basándose en la revisión de la literatura científica existente, se identifican los indicadores más relevantes para la evaluación de modelos como los descritos en las ecuaciones (2) a (4). Estos indicadores definidos a continuación, son los más frecuentemente empleados en estudios de UBEM y tienen valores de referencia establecidos.

Normalized Mean Bias Error (NMBE (%)) es una métrica estadística utilizada para evaluar el rendimiento de modelos predictivos. Se calcula para medir el sesgo promedio relativo entre los valores observados (m_i) y los valores predichos (s_i). Mide la desviación del modelo, cuánto se ajusta el modelo en general a los valores medidos, pero no mide la variabilidad de los errores individuales. Se expresa en forma de porcentaje, siendo el objetivo ideal alcanzar un NMBE cercano a 0%, lo que indica que el modelo tiene un sesgo promedio bajo. Un NMBE positivo sugiere que el modelo tiende a subestimar los valores reales y un NMBE negativo indica que el modelo tiende a sobreestimar los valores reales. Se calcula a través de la siguiente ecuación 2:

$$eq(2) \text{ NMBE } (\%) = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)}{\sum_{i=1}^n (m_i)} * 100$$

Coefficient of Variation of Root Mean Square Error (CV(RMSE) (%)) mide la magnitud promedio de los errores (RMSE) como un porcentaje del valor promedio observado. Mide la dispersión de los datos, cuánta diferencia hay entre los valores medidos y simulados, siendo una métrica que penaliza mucho los valores anómalos. Se expresa en forma de porcentaje, siendo el objetivo ideal alcanzar un CV(RMSE) cercano al 0%, lo que indica que el modelo apenas contendría errores. Se calcula con la ecuación 3:

$$eq(3) \text{ CV(RSME)} (\%) = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2}}{\bar{m}} * 100$$

Coefficient of determination (R^2) es una métrica estadística que mide con qué certeza un modelo predictivo explica la variabilidad de los datos observados. En términos simples, R^2 indica qué proporción de la variabilidad total de los datos puede atribuirse a las predicciones del modelo. No mide la precisión del modelo, pero es útil para comparar el desempeño de diferentes modelos para un mismo conjunto de datos. Se expresa en valores de 0 a 1, siendo el objetivo ideal alcanzar un R^2 de 1, donde el modelo se ajusta perfectamente a los datos y explica toda la variabilidad de éstos. Con un R^2 igual a 0 el modelo es igual a usar el valor medio de los datos, no es capaz de explicar la variabilidad de los datos. Se obtiene con la ecuación 4:

$$eq(4) R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2}{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2}$$

Donde:

m_i = valores medidos

s_i = valores simulados

n = número de datos medidos

$\bar{m}$ = media de los valores medidos

Las métricas seleccionadas, NMBE, CV(RMSE) y R^2 , son ampliamente utilizadas para evaluar modelos predictivos en este campo, aunque cada una presenta limitaciones inherentes que deben considerarse, especialmente al aplicarlas a modelos energéticos con grandes cantidades de datos, como los de escala nacional.

El NMBE cuantifica el sesgo promedio de las predicciones normalizado por la media observada. Esta métrica es particularmente útil a gran escala para evaluar si el modelo representa adecuadamente la "masa" de los edificios, capturando los valores de los tipos de edificios más frecuentes. Sin embargo, cuando los errores positivos y negativos se compensan entre sí, puede indicar falsamente un buen ajuste del modelo. Por esta razón, es fundamental incluir gráficos que comparen los valores medidos frente a los predichos en los resultados, para comprender mejor el comportamiento real del modelo.

El CV(RMSE) mide la variabilidad de los errores normalizados, pero no distingue entre errores sistemáticos (desviación) y aleatorios. Debido a la naturaleza cuadrática de los cálculos de RMSE, esta métrica es altamente sensible a valores atípicos, penalizando desproporcionadamente los casos con grandes errores. Los modelos que trabajan con grandes conjuntos de datos, como es la escala nacional, suelen contener valores atípicos, como datos mal etiquetados o

erróneos, así como datos correctos de edificios estadísticamente infrecuentes que el modelo tiene dificultades para predecir adecuadamente. Estos valores atípicos disminuyen drásticamente los resultados del CV(RMSE).

El R^2 es una métrica con capacidad limitada para evaluar el modelo de manera integral. Calcula el ajuste general del modelo en relación con la variabilidad, pero un valor alto de R^2 no garantiza precisión, ya que puede ser engañoso en presencia de errores sistemáticos o overfitting. Además, R^2 no proporciona información sobre la magnitud real de los errores, lo que es crucial para aplicaciones prácticas.

Si bien estas métricas son eficaces para conjuntos de datos más pequeños, su interpretación se complica a escala nacional. Aunque el objetivo principal es calcular el rendimiento energético de un gran número de edificios en lugar de representar con precisión cada edificio individual, los datos se presentan tanto a nivel individual como agregados en grupos de 100 edificios. Este enfoque dual asegura que el modelo funcione bien para grupos de edificios sin ocultar posibles errores en tipos específicos de edificios o regiones.

Dado que ninguna métrica es perfecta, se evaluaron las tres métricas y se analizaron gráficas para que estas se complementen y permitan una interpretación adecuada del rendimiento del modelo generado.

Además, los modelos de Big Data suelen emplear particiones de datos para la validación. Esta técnica permite entrenar el modelo en un subconjunto, validar su rendimiento en otro y evaluar su capacidad de generalización con datos no vistos. Mediante particiones, los modelos pueden abordar eficazmente los desafíos asociados al tamaño y la complejidad de los datos, asegurando que no se ajusten en exceso a los datos de entrenamiento. Para evitar sesgos de validación causados por particiones que no reflejen adecuadamente la diversidad geográfica y climática, se adoptó un enfoque de validación cruzada de 10 iteraciones (*10-fold cross-validation*), lo que reduce el riesgo de sobreajuste al conjunto de entrenamiento. Este método garantiza que se evalúen todos los tipos de edificios, climas y otros factores determinantes. Dado que los datos catastrales están organizados por región, todo el conjunto de datos se barajó aleatoriamente antes de realizar la validación cruzada, minimizando posibles sesgos.

Estas estrategias de validación cruzada, combinadas con el uso de múltiples métricas y visualizaciones, ofrecen un enfoque más integral para abordar las limitaciones inherentes de cada métrica, aumentando así la confianza en el rendimiento del modelo. A pesar de los desafíos de trabajar con grandes conjuntos de datos y múltiples tipos de edificios, este enfoque metodológico proporciona una representación fiable de las predicciones energéticas a nivel agregado e individual.

Para evaluar el modelo, se emplearon todos los datos disponibles, cubriendo los 1.246.864 edificios residenciales de los que hay CEE. Se obtuvieron los valores de NMBE, CV(RMSE) y R^2 tanto para edificios individuales como para edificios agregados, junto con las gráficas que muestran la relación entre los valores de los CEE de CEPNR y GEI y las predicciones realizadas por el modelo. Los resultados de la validación se presentan en el subapartado 5.3.2., mientras que un caso de estudio específico para predecir datos de Madrid, una Comunidad Autónoma que no forma parte del conjunto de datos de entrenamiento, se detalla en el subapartado 5.3.3.

5.2.7. Aplicabilidad del modelo

El potencial del modelo nUBEM se demuestra por su utilidad para:

- Cubrir la actual carencia de datos.
- Mapear zonas con mejor y peor desempeño energético a nivel de edificio.
- Calcular indicadores de progreso.

De los indicadores de progreso requeridos a los EM por el texto refundido de la EPBD 2024 [63] se van a calcular algunos de ellos empleando el modelo nUBEM. Los indicadores seleccionados son aquellos considerados como los más adecuados para definir las características del parque edificado residencial y su desempeño energético:

- Número de edificios y superficie total por clase de desempeño energético.
- Número de edificios, número de viviendas y superficie total correspondientes al 43% de los edificios con peor desempeño (incluyendo una definición).
- Emisiones operativas anuales de gases de efecto invernadero por tipo de edificio.

En relación con la aplicabilidad del modelo, deben definirse varios aspectos:

España está dividida en distintas zonas climáticas, definidas en las regulaciones españolas [180]. Estas zonas se representan con letras de la A a la E para los climas invernales y la letra Alpha para las Islas Canarias, mientras que para los climas estivales se utilizan números del 1 al 4, ambos rangos variando de condiciones suaves a severas. Estas zonas poseen un fuerte impacto en las demandas de calefacción y refrigeración de los edificios, por ello la legislación española adapta las clasificaciones energéticas de los edificios según la zona climática en que se encuentran.

5. Predicción del comportamiento energético del parque edificado sin certificar: modelo nUBEM

5.2. Propuesta de una metodología basada en Machine Learning (ML) para abarcar todos los edificios de España

Las clases energéticas en España se dividen en clases de energía de CEPNR y clases de energía por emisiones de GEI, con etiquetas que van desde la A hasta la G. Los valores límite están organizados de acuerdo con [117]. Este documento establece los valores límite para cada clase energética dependiendo de tres factores: la zona climática, el tipo de edificio (vivienda unifamiliar o plurifamiliar), y si el edificio se encuentra en un clima peninsular o extrapeninsular.

La figura 28 presenta, a modo de ejemplo, los rangos de valores límite para determinar la clase energética de los edificios plurifamiliares en climas peninsulares según su zona climática. La figura ilustra cómo los valores para las clases varían significativamente según la zona climática, ya que las necesidades de calefacción y refrigeración difieren ampliamente.

El modelo asigna automáticamente la clase correspondiente a cada edificio según la normativa.

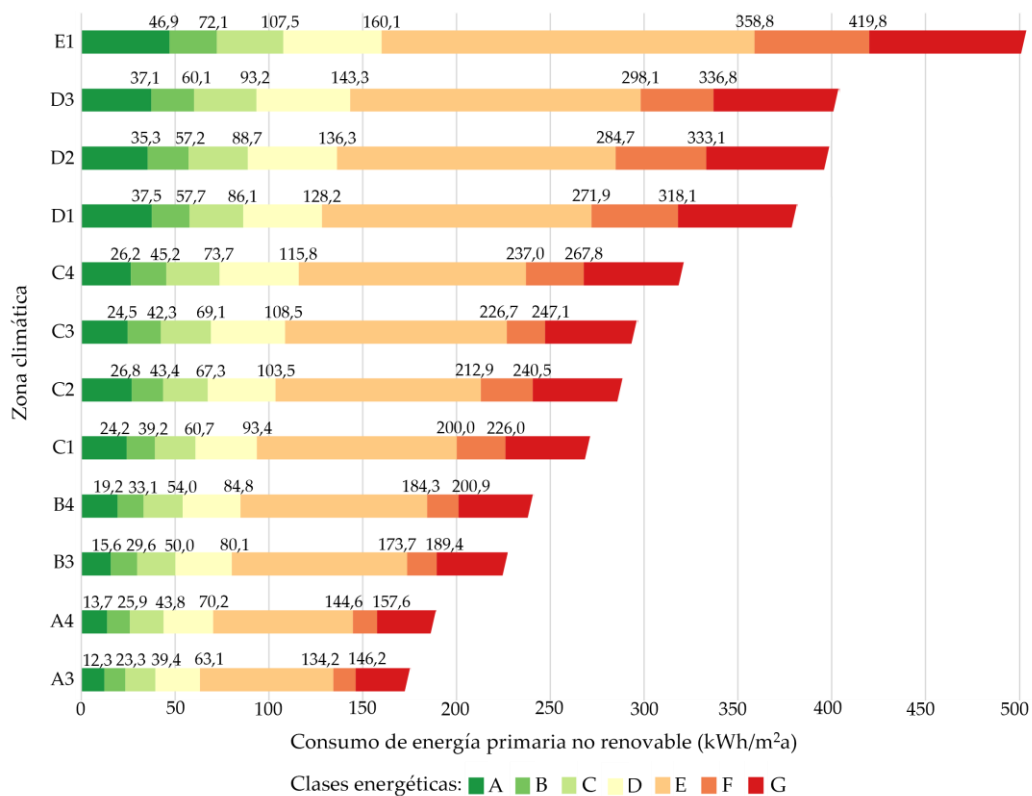


Figura 28. Rangos de CEPNR para la clasificación energética de edificios plurifamiliares en climas peninsulares según la legislación española [117]. Elaboración propia, publicada en [162].

5.3. Validación y aplicación del modelo

5.3.1. Elección del algoritmo

Comparando los resultados de los algoritmos, los hallazgos se resumen en la tabla 15. Los mejores resultados se obtuvieron con la técnica de árboles de decisión potenciados por gradiente (*Gradient Boosted Trees*), con XGBoost [227] como el mejor algoritmo para este problema, obteniendo Deep Learning resultados similares. El algoritmo que presentó los mejores resultados fue XGBoost, con hiperparámetros de 500 árboles, una tasa de aprendizaje (η) de 0,05 y una profundidad máxima permitida para cada árbol de 10. XGBoost superó a otros algoritmos en el marco del nUBEM debido a su capacidad para gestionar conjuntos de datos complejos y de alta dimensionalidad, así como para capturar relaciones no lineales, aspecto crítico en el modelado del rendimiento energético. Además, la eficiencia de XGBoost con grandes volúmenes de datos y su interpretabilidad mediante el análisis de la importancia de las variables lo convierten en una herramienta ideal para comprender los factores clave que influyen en el rendimiento energético.

Tabla 15. Desempeño de los diferentes algoritmos. En verde: Mejor rendimiento. En verde claro: Alternativas con rendimiento similar. En blanco: alternativas con peor rendimiento.
Elaboración propia, publicada en [162].

Modelos	NMBE %	CV(RMSE) %	R ²
Generalized Linear Model	0,031	42,2	0,24
Deep Learning	0,028	38,7	0,36
Decision Tree	0,030	40,8	0,29
Random Forest	0,029	39,4	0,36
Gradient Boosted Trees	0,028	38,4	0,38
Support Vector Machine	0,029	39,5	0,32

5.3.2. Evaluación del modelo

Basándose en los resultados obtenidos en la sección anterior, se decidió utilizar el algoritmo XGBoost, calibrando sus parámetros para desarrollar el modelo completo. En las figuras 29 y 30, se presenta la gráfica que compara los valores simulados mediante el uso de aprendizaje automático y los valores reales de los CEE, tanto en el CEPNR como en las emisiones de GEI. Los resultados muestran la capacidad del modelo para predecir con alta precisión el rendimiento energético agregado de los edificios.

Los resultados del modelo en cuanto a CEPNR a escala de edificio individual muestran un NMBE de -0,027% y un CV(RMSE) de 37,7%. Estas métricas indican que el modelo es preciso en agregado, ya que el NMBE de -0,027% (más cercano a 0 que el estándar ASHRAE de $\pm 5\%$) demuestra una desviación mínima en las predicciones. Sin embargo, el CV(RMSE) de 37,7% (idealmente cercano a 0) supera el umbral de 15% establecido por ASHRAE, lo que sugiere una mayor dispersión, es decir, una menor precisión en las estimaciones de edificios individuales con casos atípicos en los que falla al tratar de predecir. Cuando los edificios se analizan en conjunto, el rendimiento del modelo mejora notablemente, cumpliendo o superando los estándares de ASHRAE. De hecho, la agregación de edificios por tipología y ciudad logra el cumplimiento de los criterios de ASHRAE en el 99% de los casos para grupos con más de 100 edificios.

Es importante señalar que las pautas de ASHRAE se aplican específicamente a modelos de la categoría 'UBEM para recomendaciones a nivel de edificio', que requieren un conocimiento detallado y alta precisión para cada edificio individual, expectativas que exceden los objetivos y capacidades de este modelo. El nUBEM presentado se clasifica en la categoría 'UBEM para estrategias de reducción de carbono a nivel de parque edificado', donde los requisitos de precisión son menos estrictos. A pesar de ello, el modelo se desempeña notablemente cerca de los estándares de ASHRAE. El bajo valor de NMBE demuestra su alta capacidad para predecir el rendimiento general del parque edificado, mientras que el CV(RMSE) más elevado refleja las limitaciones esperadas, especialmente debido a la información limitada sobre casos atípicos. Estos resultados concuerdan bien con los hallazgos de Oraiopoulos et al. [161], quienes documentaron tendencias similares en la precisión para datos agregados de edificios en estudios UBEM. Consistente con la literatura existente, el CV(RMSE) elevado a nivel de edificio individual es un resultado típico para modelos energéticos urbanos de gran escala (UBEM). Las figuras 29 y 30 ilustran estos resultados, mostrando que el modelo predice adecuadamente el rendimiento agregado de edificios, aunque enfrenta retos con valores individuales anómalos. Se puede observar cómo la desviación, que se representa en cómo los datos se alinean en una diagonal a 45°, coincide en buena medida, sin que la línea se desvíe de la inclinación. Asimismo, en las figuras se puede apreciar la dispersión, representada como la "anchura" de la línea, lo que indican los píxeles en amarillo alejados de la diagonal, que son los casos atípicos que el modelo ha predicho peor.

De manera similar, la predicción de emisiones de GEI muestra tendencias semejantes, con un NMBE de 0,049% y un CV(RMSE) de 43,3%, llevando a conclusiones similares a las presentadas en el CEPNR. Cabe destacar que el aumento en la dispersión de datos se debe a la falta de información sobre el vector energético en los datos abiertos, lo que agrega un nivel de incertidumbre al realizar predicciones.

El objetivo principal del modelo es estimar el CEPNR y las emisiones de GEI para grandes grupos de edificios, facilitando el cálculo de indicadores de progreso y la identificación de áreas de bajo rendimiento. Aunque no proporciona predicciones precisas para cada edificio individual en el parque residencial español debido a las limitaciones en los datos disponibles, evalúa eficazmente el rendimiento de diferentes áreas urbanas y analiza las características de los edificios con baja eficiencia energética.

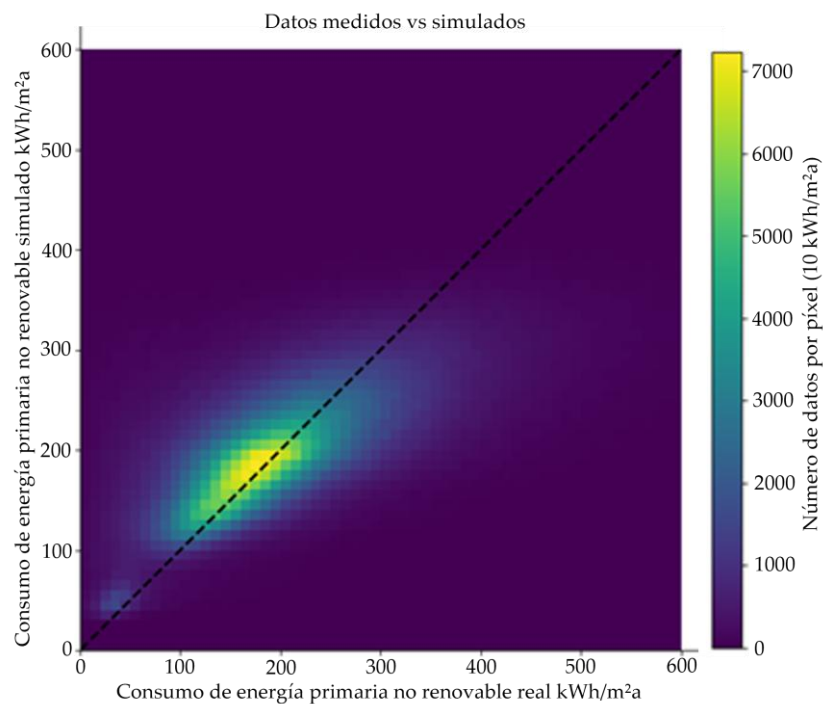


Figura 29. Mapa de calor comparando los datos reales, obtenidos de los CEE, y predichos de CEPNR. Cada píxel representa un rango de 10 kWh/(m²año), y el color indica la cantidad de puntos de datos en cada píxel. Elaboración propia, publicada en [162].

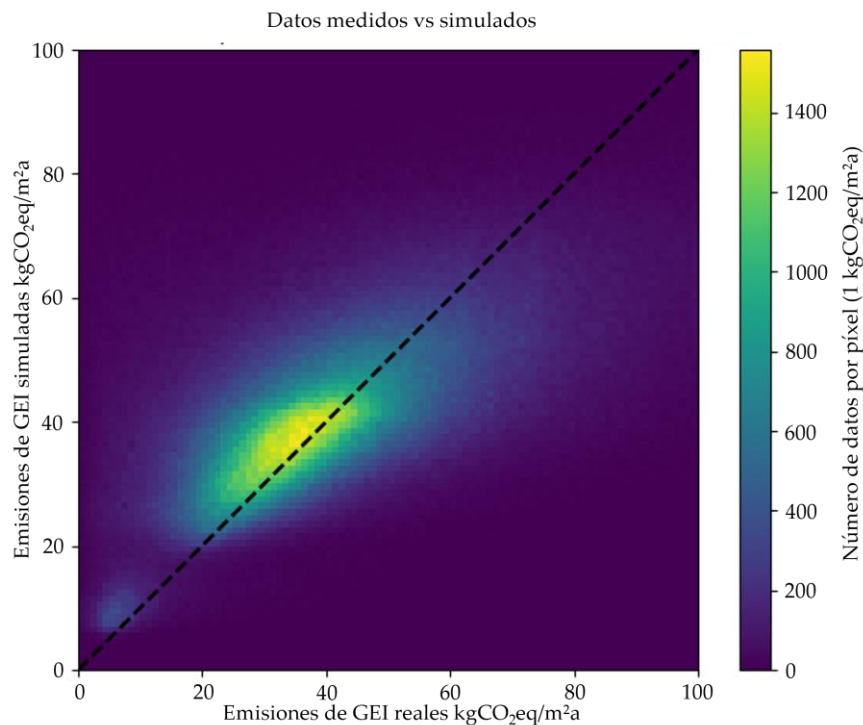


Figura 30. Mapa de calor comparando los datos reales, obtenidos de los CEE, y predichos de emisiones de GEI. Cada píxel representa un rango de 1 kgCO₂eq/(m²año), y el color indica la cantidad de puntos de datos en cada píxel. Elaboración propia, publicada en [162].

En la tabla 16 se presenta una comparación entre el modelo propuesto en este estudio, denominado nUBEM, y otros modelos de la literatura científica. La tabla indica el tipo de modelo según su propósito, el número de edificios utilizados para evaluarlo, la escala y su precisión en términos de valores individuales y resultados agregados. Como se puede observar en la tabla, los resultados del nUBEM son muy satisfactorios, con el modelo prediciendo con precisión el parque edificado y logrando valores muy positivos en comparación con los encontrados en la literatura científica, especialmente en estudios de gran escala.

A gran escala, el modelo alcanza un valor de R² más preciso que el obtenido con el modelo AutoBEM (donde valores más cercanos a 1 indican un mejor rendimiento). Además, al examinar los gráficos incluidos en su artículo [33], queda claro que el modelo nUBEM gestiona de manera más efectiva tanto la desviación como la dispersión de los datos, lo que da lugar a un modelo que representa mejor el rendimiento energético. Tal como se destaca en el mismo artículo [33], el desafío de predecir el tipo de vector energético utilizado para calefacción añade complejidad al modelo, incrementando el margen de error. Esto también se refleja en el nUBEM, cuyos resultados para la predicción de emisiones de GEI son ligeramente inferiores a los del modelo CEPNR, en parte debido a la falta de información sobre el vector energético. Una diferencia significativa entre ellos radica en la fuente de los datos utilizados, aun siendo

datos similares, como las características físicas y geográficas de los edificios, la información fue obtenida de fuentes muy diferentes. AutoBEM emplea datos derivados de fuentes de acceso abierto que no son recopiladas por organismos oficiales (por ejemplo, registros catastrales o CEE), sino extraídos de DTM, encuestas y Mapas Anuales de Áreas Artificiales Impermeables (*Annual Maps of Global Artificial Impervious Area*). Este enfoque tiene un gran potencial para su aplicación directa en otros países, pero también aumenta el riesgo de datos mal etiquetados y eleva los requisitos computacionales para el procesamiento de la información. En contraste, el uso de fuentes de información pública, como los registros catastrales, responsables de recopilar, procesar y publicar datos, facilita un acceso más sencillo a información confiable. Estas fuentes públicas permiten recopilar datos fiables sobre edificios, como su uso, fecha de construcción o número de viviendas, mientras exigen menos recursos computacionales para gestionar la información.

En cuanto al modelo a escala regional presentado por Filogamo et al. [228], clasifica las viviendas en la región de Sicilia en arquetipos, obteniendo resultados agregados que subestiman el consumo energético total en un 7,77%, lo que se considera dentro de límites aceptables. Sin embargo, dado que los resultados solo pueden compararse a escala regional, no es posible determinar si los arquetipos generados representan con precisión las viviendas o si las sobreestimaciones y subestimaciones se compensan a nivel regional. En este punto, el uso de CEE para generar el modelo permite un análisis más detallado de los resultados, lo que facilita evaluar si las simulaciones reflejan con precisión el comportamiento energético de los edificios. El modelo nUBEM logra una desviación total mucho menor que la de Filogamo et al. (donde valores más cercanos a 0 son mejores). Sin embargo, es importante señalar que, a medida que se incorporen más datos, es probable que los resultados mejoren. Además, el modelo debería compararse a escala individual para facilitar evaluaciones más precisas de su rendimiento.

Comparado con modelos a escala urbana, este modelo logra resultados muy buenos tanto a nivel individual como agregado, ya que ha sido capaz de aprender de un gran número de patrones gracias a la disponibilidad de una cantidad significativa de datos. Sin embargo, los modelos a escala de distrito muestran un mejor rendimiento que el modelo presentado, principalmente porque pueden identificar y gestionar casos infrecuentes de manera más efectiva, ya que suelen contar con un nivel de información mucho más detallado y específico. Esto se traduce en valores más altos de CV(RMSE) y R^2 .

Por ejemplo, Heinderthaler et al. [164] presentan dos sistemas de calefacción por district heating con resultados satisfactorios en términos de precisión, particularmente en la métrica R^2 . Al examinar sus gráficos, el modelo refleja una precisión razonable en varios tipos de edificios. Sin embargo, como destacan los autores, el modelo no logra proporcionar resultados válidos a escala de

arquetipos individuales debido a los altos valores de CV(RMSE) y al número limitado de muestras. No obstante, los resultados agregados ya son aceptables para un número reducido de edificios.

Li y Yao [147] emplean un enfoque híbrido para modelar el consumo de energía para calefacción y refrigeración del parque edificado a escala de barrio, utilizando diversas fuentes de datos sobre edificios y complementándolas con datos estadísticos nacionales. Esto da lugar a arquetipos altamente detallados que incorporan factores como la infiltración de aire, el ratio ventana-pared, la densidad de ocupantes, equipos e iluminación, entre otros. Estos modelos detallados se utilizan para entrenar diversos modelos de aprendizaje automático, logrando un alto nivel de precisión en los resultados.

Tabla 16. Comparación de Modelos UBEM según su Propósito de acuerdo con [151], Número de Edificios, Escala y Precisión Obtenida para Valores Individuales y Agregados Totales. 2: UBEM para estrategias de reducción de carbono a nivel de parque edificado, 3: UBEM para recomendaciones a nivel de edificio, 4: UBEM para la integración de edificios con la red eléctrica, NMBE: Error Medio Sesgado Normalizado, CV(RMSE): Coeficiente de Variación del Error Cuadrático Medio, R²: Coeficiente de Determinación, CEPNR: Consumo de Energía Primaria No Renovable, GEI: Gases de Efecto Invernadero, CE: Consumo Energético, UEA: Uso Energético Anual, DC: Demanda de Calefacción, DEA: Demanda Energética Anual, viv: viviendas, -: sin datos. Elaboración propia, publicada en [162].

Características				Precisión en datos individuales			Precisión en datos agregados	
Modelo	Tipo de modelo	Número de edificios	Escala	NMBE %	CV (RMSE) %	R ²	Desviación en valores totales %	R ² valores totales
nUBEM (CEPNR)	2	1.246.864	País	-0,027	37,7	0,39	-0,177 (CEPNR)	0,998
nUBEM (GEI)	2	1.246.864	País	-0,049	43,3	0,36	0,198 (GEI)	0,998
AutoBEM [33]	2	50.843	País	-	-	0,069	-	-
Filogamo et al. [228]	2	1.717.00 viv.	Región	-	-	-	-7,77 (CE)	-
Olivo et al. [229]	2	859.740	Ciudad	-	-	-	5 (UEA)	0,74
Gassar et al. [230]	2	-	Ciudad	-	-	-	-	0,998
CESAR [231]	3	78	Ciudad	-	-	-	-1,05 (DC)	-
Johari et al. [232]	3	2.044	Ciudad	10	54	-	10 (DEA)	-

Johari et al. [233]	4	2.326	Ciudad	-	-	-	14 (DEA)	-
Aguacil et al. [170]	3	400 viv.	Ciudad	25	-	-	-	-
Li and Yao [147]	3	573	Districto	-	17,3	-	-	-
Heinderthaler et al. [164]	3	53	District heating 1	10	32	0,83	-	-
Heinderthaler et al. [164]	3	13	District heating 2	-9	44	0,76	-	-
Garbasevski et al. [148]	2	245.490	Ciudad	-	-	-	4,5	-

En el Anexo D, en las tablas D.1 y D.2 se muestra una comparación del modelo nUBEM con los estudios de la literatura científica, donde se muestran las diferentes aproximaciones realizadas y los datos que cada modelo requiere de entrada y los resultados que obtiene junto a la resolución espacial que alcanza y se clasifica de forma orientativa el esfuerzo computacional que implican los modelos y la reproducibilidad de los estudios.

Modelos como CESAR [231] y AutoBEM [33] trabajan a escala nacional y edificio a edificio, pero dependen de simulaciones energéticas masivas basadas en arquetipos, lo que implica un esfuerzo computacional muy alto y la necesidad de supercomputadoras, esto lleva a que estos modelos tengan una baja reproducibilidad por su coste computacional. En contraste, el nUBEM se genera sin simulaciones, empleando los datos abiertos de los CEE, con un esfuerzo computacional bajo y alta reproducibilidad gracias a los datos en abierto y el código publicado en abierto. Modelos estadísticos como Filogamo et al. (2014) [228] o Aguacil et al. (2017) [170] requieren bajo esfuerzo computacional, pero trabajan a escalas agregadas (región o ciudad) y utilizan arquetipos, lo que reduce la precisión a nivel de edificio. Otros híbridos como Gassar et al. (2019) [230] o Li & Yao (2021) [147] combinan Machine Learning y simulación, pero dependen de datos locales no abiertos, con reproducibilidad media y resolución espacial más limitada (distrito o ciudad). La incorporación del GIS nos permite identificar espacialmente los edificios, lo que es una ventaja frente a modelos puramente alfanuméricos, [33] y [230].

Mientras Olivo et al. (2017) [229] y Heidenthaler et al. (2023) [164] incorporan información geoespacial y consumos, ambos mantienen una dependencia de simulaciones y datos restringidos, con esfuerzo computacional medio o alto y reproducibilidad baja o media. El nUBEM combina la resolución espacial edificio a edificio de los modelos más complejos con la eficiencia computacional de los enfoques estadísticos, siendo el único en la tabla que ofrece datos y código abiertos, lo que lo hace escalable y replicable en otros contextos o para otros usos.

5.3.3. Aplicabilidad del modelo

El modelo propuesto permite medir el avance de la descarbonización a nivel nacional mediante la verificación periódica y automática del CEPNR y las emisiones de GEI. Con esta información, se pueden respaldar políticas basadas en datos y definir una estrategia nacional de rehabilitación fundamentada en la información disponible.

Como ejemplo de la aplicabilidad del modelo, se muestra el potencial de generar información y la mejora en los datos obtenidos, logrando diversos indicadores de progreso requeridos por la revisión de la EPBD de 2024. Estos indicadores ayudan a definir el parque de edificios residenciales y sus características, contribuyendo a la formulación de objetivos y planes de rehabilitación nacionales.

5.3.3.1. Potencial del modelo para cubrir la carencia de datos actualmente existentes

Actualmente, los datos existentes sobre edificios residenciales con CEE en bases de datos abiertas cubren aproximadamente el 13,8% de los edificios residenciales en España. En la figura 31 se puede observar la evolución de los datos disponibles a nivel nacional que se pueden obtener con este modelo. Los edificios abarcan todas las zonas climáticas de España, y el número de edificios certificados permite generar una visión casi completa del sector residencial español.

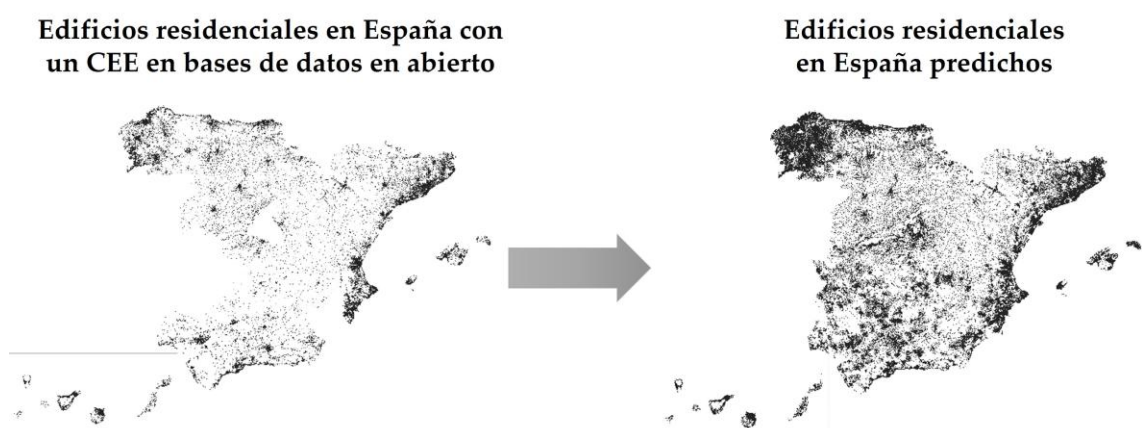


Figura 31. Edificios residenciales en España con un CEE disponible en bases de datos abiertas (izquierda) y Edificios residenciales en España predichos utilizando el modelo nUBEM (derecha). Elaboración propia, publicada en [162].

Como el modelo aprende de patrones y relaciones entre las diferentes variables de los datos, aunque en una zona rural pueda no haber ningún CEE hay en las zonas de alrededor edificios con patrones similares, aprendiendo de los diferentes edificios con características equivalentes para predecir el resto.

5.3.3.2. Mapeo de zonas con mejor y peor comportamiento energético a nivel de edificio

En la figura 32 se presenta una vista ampliada del modelo nUBEM en la zona de Barajas, Madrid, contrastando los edificios residenciales de nueva construcción con el centro histórico de Barajas. Los edificios se clasifican según su CEPNR y se muestra su correspondiente clase de rendimiento energético. Cabe destacar cómo el centro histórico de Barajas (en rojo, a la derecha) presenta una eficiencia energética mucho menor en comparación con los nuevos bloques más grandes (en verde, a la izquierda), donde los edificios más eficientes se construyeron en 2017 y los menos eficientes en 2008. Los edificios verdes a la izquierda de la imagen se construyeron en 2023, en contraste con los edificios del centro histórico, que datan de 1950 a 1980. Este caso es particularmente interesante, ya que Madrid no está entre las regiones de España que proporcionan acceso abierto a sus CEE, lo que lo convierte en un estudio valioso para mostrar cómo el modelo puede llenar las brechas de información.

El modelo ha aprendido las relaciones entre variables a nivel nacional y las aplica adecuadamente en todas las regiones.



Figura 32. Vista detallada del modelo nUBEM en Madrid. De verde a rojo: Edificios residenciales clasificados según CEPNR, valores de las clases energéticas mostrados para edificios multifamiliares en la zona climática D3, en gris: Edificios no residenciales. CEPNR: Consumo de Energía Primaria No Renovable. Elaboración propia, publicada en [162].

El modelo proporciona valores de CEPNR y emisiones de GEI suficientemente precisos para evaluar distritos, barrios y escalas mayores, lo que ayuda a identificar áreas energéticamente ineficientes. El valor obtenido para cada edificio es una estimación estadística basada en sus características, derivada mediante el algoritmo de ML. Si bien es estadísticamente preciso al agrupar edificios, es importante destacar que el valor de CEPNR individual predicho para cada edificio no puede considerarse exacto para cada edificio específico, ya que un edificio puede tener características únicas que escapan a los parámetros habituales y presentar un CEPNR impredecible para el algoritmo. Por lo tanto, es necesaria una validación individual de un edificio para determinar con precisión su rendimiento energético, lo que excede las capacidades del modelo, ya que no es su objetivo y supera las capacidades de los datos actualmente disponibles.

5.3.3.3. Número de edificios y superficie total por clase energética

Las clases energéticas en España muestran una fuerte tendencia hacia la clase E, que domina con el 81% de los edificios y cubre la mayoría del sector residencial español, seguida por la clase F con el 7,7%, la clase D con el 5,2%, la clase G con el 4,4%, y las clases más eficientes (A, B y C), que representan el 1,4%. Estos resultados parecen alinearse con las tendencias mostradas en el informe oficial [215], que, aunque señala resultados más positivos, indica que el 80% de los CEE se encuentran en las tres peores letras.

La realidad del parque edificado actual, donde los nuevos edificios deben ser certificados, pero los existentes solo si se alquilan o venden, parece confirmar que el porcentaje de calificaciones ineficientes es mucho mayor.

Las tablas 17 y 18 muestran los valores promedio y totales de CEPNR y emisiones de GEI por clase de rendimiento energético. Como se muestra en la figura 28, dado que los rangos varían según la zona climática y el tipo de edificio, muchas de las calificaciones G en las Islas Canarias (con rangos más bajos) hacen que el valor promedio de las calificaciones G sea menor que las de las clases E y F, lo que a primera vista parece inusual.

Tabla 17. Número de edificios, superficie construida, CEPNR promedio kWh/m²a y CEPNR total kWh/a por clase de rendimiento energético en España. CEPNR: Consumo de energía primaria no renovable, GEI: Emisiones de gases de efecto invernadero. Elaboración propia, publicada en [162].

Clase	Número de edificios	Superficie construida	CEPNR medio kWh/m ² a	CEPNR total kWh/a	Emisiones GEI medias kgCO ₂ /m ² a	Emisiones GEI totales kgCO ₂ /a
A	10.983	3.417.313	46,24	145.579.347	11,11	32.216.048
B	45.363	16.755.555	64,78	946.536.410	14,15	197.355.494
C	73.090	32.431.374	94,31	2.514.654.132	20,14	519.241.248
D	451.393	118.902.156	165,95	17.956.642.013	37,16	3.962.400.366
E	7.054.623	2.238.048.969	246,58	473.078.264.181	53,57	101.165.823.218
F	664.791	144.744.180	275,06	34.500.491.341	58,56	7.302.608.855
G	378.870	125.572.100	184,23	20.621.312.769	41,84	4.781.965.848

Tabla 18. Número de edificios, superficie construida, emisiones de GEI promedio $\text{kgCO}_2/\text{m}^2\text{a}$ y emisiones de GEI totales kgCO_2/a por clase de emisiones de GEI en España. CEPNR: Consumo de energía primaria no renovable, GEI: Emisiones de gases de efecto invernadero. Elaboración propia, publicada en [162].

Clase	Número de edificios	Superficie construida	Emisiones GEI medias $\text{kgCO}_2/\text{m}^2\text{a}$	Emisiones GEI totales kgCO_2/a	CEPNR medio $\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$	CEPNR total kWh/a
A	15.474	6.214.555	9,57	51.271.987	52,37	292.471.440
B	54.397	23.280.581	13,97	267.932.772	68,65	1.395.593.965
C	79.213	32.594.351	21,39	578.346.685	103,86	2.866.056.800
D	711.303	190.294.671	35,00	6.116.364.525	168,69	29.479.214.410
E	7.124.092	2.267.940.997	53,94	$1,034 \times 10^{11}$	248,96	$4,838 \times 10^{11}$
F	458.036	79.337.176	66,52	4.603.973.106	290,79	20.157.771.543
G	236.598	80.209.316	39,99	2.936.866.706	159,86	11.674.277.526

5.3.3.4. Número de edificios y superficie total del 43% de los edificios con peor comportamiento energético.

La revisión de la EPBD de 2024 establece la identificación del 43% de los edificios con peor rendimiento, estableciendo como indicadores obligatorios el número de edificios y la superficie total de los edificios residenciales con peor rendimiento [63]. La directiva europea requiere aportar la definición de los edificios con peor rendimiento. Para este estudio, se considera que el valor de CEPNR es el indicador más adecuado para determinar qué edificios son los menos eficientes.

Con el modelo propuesto, se identifica el 43% con un CEPNR por m^2 más alto, obteniendo un total de 3.732.037 edificios con 5.748.002 viviendas, que corresponden a una superficie construida de $612.877.691 \text{ m}^2$. El CEPNR promedio de este grupo de edificios es de $303.46 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{año})$ y el CEPNR total de $179.919.636.781 \text{ kWh/año}$.

Al analizar el 43% de los edificios con peor rendimiento, se observan los siguientes puntos:

- El límite para que un edificio se considere dentro del 43% de peor rendimiento es un CEPNR de $253,22 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{año})$.
- Las viviendas unifamiliares representan el 92% de estos edificios.
- Los edificios ubicados en las zonas climáticas D y E, las más frías, representan el 80,10% de los mismos.

- Los edificios construidos antes de 1940 representan el 35,34%, entre 1941-1960 el 16,15%, entre 1961-1980 el 25,41% y entre 1981 y 2007 el 22,62%.

Este modelo permite la identificación dirigida de zonas de edificios con un rendimiento energético específico a través de municipios, distritos, regiones y zonas climáticas. Dado que los valores de CEPNR varían significativamente según la zona climática, el modelo es capaz de aislar los edificios con peor rendimiento dentro de cada zona climática en España. Este enfoque identifica no solo los edificios con mayor consumo, que generalmente se concentran en las zonas más frías, sino aquellos con el peor rendimiento energético relativo a las demandas energéticas de sus respectivas zonas climáticas.

La tabla 19 resume los umbrales de CEPNR y emisiones de GEI que clasifican a un edificio dentro del 43% con peor rendimiento en cada zona climática. Estos datos destacan la importancia de la zona climática, ya que el 43% superior del consumo energético es 2,6 veces mayor en zonas frías en comparación con las zonas cálidas, acompañado de emisiones que son 2,3 veces superiores. Esto subraya la necesidad urgente de implementar intervenciones específicas en estas áreas, dado que presentan el mayor potencial para el ahorro energético.

Tabla 19. Valor límite del CEPNR para considerar un edificio entre el 43% de los edificios con peor comportamiento energético en cada zona climática de España. Elaboración propia, publicada en [162].

Zona climática	Valor límite CEPNR kWh/m ² a	Valor límite Emisiones GEI kgCO _{2eq} /m ² a
Alpha 3	125,4	32,2
A2	148,6	34,8
A3	146,9	28,7
A4	153,4	29,5
B3	194,1	42,8
B4	192,1	38,0
C1	250,0	56,0
C2	229,3	49,4
C3	220,1	45,5
C4	230,8	47,2

D1	293,7	67,4
D2	284,7	63,4
D3	278,8	60,5
E1	328,3	74,3

5.3.3.4. Emisiones anuales de gases de efecto invernadero operativos ($\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{m}^2$ año) por tipo de edificio

Los edificios residenciales en España presentan un CEPNR promedio de 239,35 kWh/m²año y unas emisiones promedio de GEI de 52,04 kgCO_{2eq}/m²año. Los datos se presentan en la tabla 20, donde se clasifica el tipo de edificio según la tipología utilizada por la Estrategia a Largo Plazo para la Rehabilitación Energética en el Sector de la Edificación en España (ERESEE) [234], [216]. Esta clasificación también ha sido empleada en estudios previos [202], [235], [236], [237], [238], [239].

Cabe destacar que el CEPNR y las emisiones de GEI han disminuido de manera significativa en las últimas décadas, principalmente debido a la implementación de legislaciones en materia energética introducidas en los años 2008 y 2019 en el sector de la construcción. Esta tendencia pone de relieve el desafío crítico de descarbonizar el parque edificado, dado que una porción sustancial del consumo energético y las emisiones proviene de edificios construidos entre 1960 y 2007.

Tabla 20. Número de edificios, superficie construida, CEPNR promedio y total, emisiones promedio de GEI y emisiones totales por tipo de edificio residencial según la Estrategia a Largo Plazo para la Rehabilitación Energética en el Sector de la Edificación en España (ERESEE). Uu: Vivienda unifamiliar, Cc: Bloque de vivienda plurifamiliar con 3 o menos plantas, Bb: Bloque de vivienda plurifamiliar con más de 3 plantas. Elaboración propia, publicada en [162].

Tipo de edificio	Número de edificios	Superficie construida	CEPNR medio kWh/m ² año	CEPNR total kWh/año	Emisiones GEI medias kgCO ₂ /m ² a	Emisiones GEI totales kgCO ₂ /a
Uu <1940	2.134.183	301.957.824	266,36	76.066.608.307	57,95	16.697.047.758
Uu 41-60	933.516	127.930.130	268,90	32.719.342.689	58,56	7.146.662.044
Uu 61-80	1.461.467	212.817.509	262,20	53.086.111.371	57,20	11.642.788.779
Uu 81-07	2.464.120	387.925.847	224,34	82.938.611.561	49,22	18.338.783.131
Uu 08-11	222.509	39.467.137	171,80	6.341.922.091	37,49	1.394.566.222

Uu 12-23	195.711	38.363.725	111,66	3.817.920.395	23,64	808.278.271
Cc <1940	91.408	26.152.128	237,64	5.979.520.959	51,42	1.291.723.803
Cc 41-60	71.817	20.638.135	238,01	4.836.948.841	51,16	1.037.677.545
Cc 61-80	149.544	54.103.556	224,35	11.890.514.820	48,19	2.543.450.158
Cc 81-07	251.349	208.529.917	196,73	39.098.724.933	42,04	8.288.545.922
Cc 08-11	28.532	32.523.999	162,83	5.110.705.256	34,34	1.067.181.849
Cc 12-23	11.379	14.596.361	99,93	1.276.785.871	20,91	260.238.373
Bb <1940	48.503	40.228.068	221,33	8.636.836.437	46,74	1.823.774.145
Bb 41-60	57.417	60.688.978	234,77	13.757.176.878	49,32	2.896.350.094
Bb 61-80	277.315	455.999.315	214,47	93.474.623.910	45,03	19.700.388.275
Bb 81-07	239.096	537.966.687	188,02	96.028.587.556	39,34	20.027.333.473
Bb 08-11	28.888	74.935.487	153,71	10.862.847.649	31,65	2.232.384.138
Bb 12-23	12.358	45.046.627	94,11	3.839.665.175	18,94	764.431.671

5.4. Discusión

Los resultados validan la efectividad del modelo para su propósito: crear una representación a escala nacional del rendimiento energético de los edificios que avale políticas de descarbonización basadas en datos.

El modelo estima el CEPNR y las emisiones de GEI para más de 1.246.000 edificios en toda España, permitiendo un análisis exhaustivo del parque residencial. Su alta fiabilidad en la agregación de datos respalda el desarrollo de estrategias de descarbonización y la evaluación de impactos a múltiples niveles—distrito, barrio, ciudad, región y país—y para diversas tipologías de edificios dentro de áreas urbanas o regionales. Además, el modelo identifica las características y ubicaciones de las tipologías de edificios con peor comportamiento energético.

Aunque el modelo carece de precisión a escala individual, debido a la limitada disponibilidad de datos sobre sistemas energéticos y la influencia de valores atípicos no identificables, esta limitación no afecta su objetivo. Su diseño está orientado al análisis a gran escala en lugar de la especificidad de un solo edificio, lo que lo hace idóneo para apoyar estrategias de descarbonización.

5.4.1. Variables clave en el modelo predictivo

Para identificar las variables más importantes en la predicción del CEPNR y las emisiones de GEI, se puede emplear el algoritmo XGBoost para obtener la ganancia total (*total gains*) de cada variable de entrada en el modelo. Esto permite determinar la mejora en precisión que cada variable aporta al modelo general.

La figura 33 muestra que la zona climática es, con amplia diferencia, la variable más influyente en el modelo, seguida por el año de construcción, la compacidad y el tamaño de la vivienda. Estas cuatro variables son fundamentales para caracterizar con precisión el CEPNR, lo que resalta su alta relevancia. Además, el porcentaje de superficie expuesta de la envolvente se identifica como un factor significativo dentro del algoritmo de aprendizaje automático, aportando valiosas perspectivas derivadas del modelo. Otra variable relevante es la Calidad de la construcción, una métrica interna del Catastro español utilizada principalmente con fines fiscales. Curiosamente, esta métrica mejora el modelo al proporcionar información complementaria que incrementa su precisión predictiva.

Es importante señalar el limitado impacto de las variables Año de reforma o rehabilitación y Coste de la reforma o rehabilitación, que, aunque teóricamente son fundamentales para evaluar el comportamiento energético de los edificios, tienen una relevancia limitada en el modelo actual. Si bien estas variables están registradas en el catastro español, siendo las variables del catastro alfanumérico: Año de reforma en caso de existir e Indicador del tipo de reforma o rehabilitación, carecen de especificidad, ya que no se indica si las rehabilitaciones están relacionadas con la eficiencia energética o se centran en otros aspectos del edificio, como reformas interiores por razones estéticas. Esta falta de detalle se ve agravada por la ausencia, hasta la EPBD de 2024, de una definición legal a nivel de la UE sobre qué califica como una rehabilitación profunda.

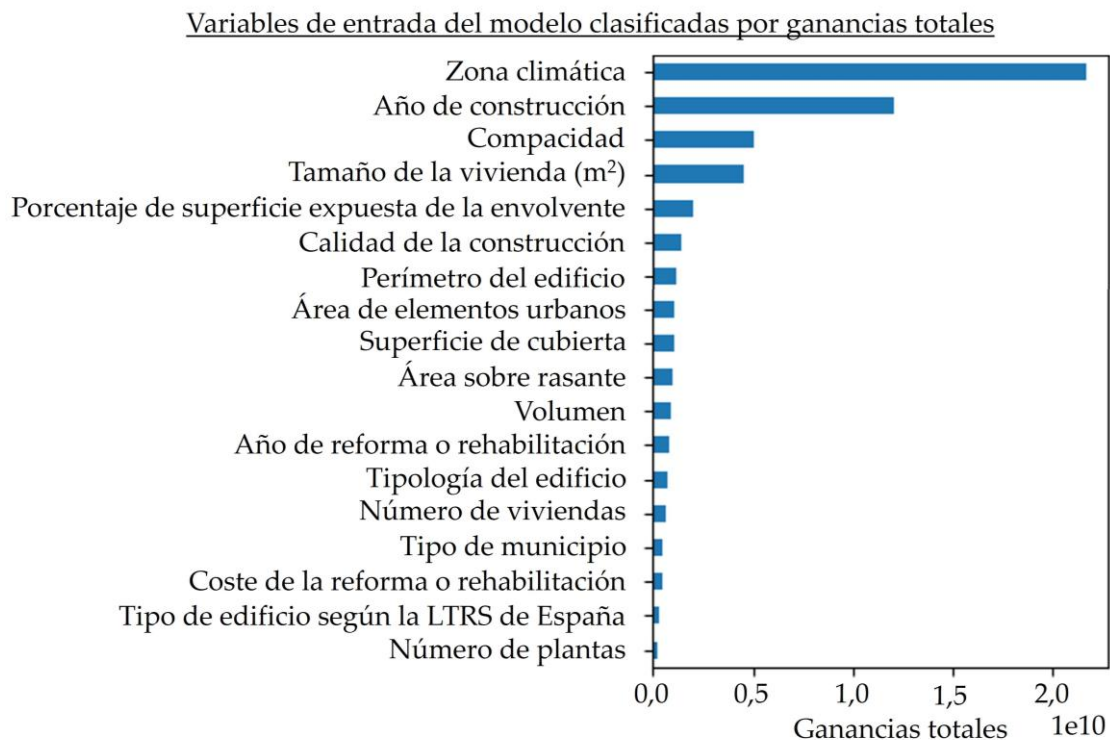


Figura 33. Ganancias totales de las principales variables de entrada del modelo. LTRS: Estrategia de Rehabilitación a Largo Plazo. Elaboración propia, publicada en [162].

La nueva EPBD define la rehabilitación profunda como aquella alineada con el principio de "primero la eficiencia energética", centrada en elementos esenciales del edificio y que lo transforma en un edificio de energía casi nula. Sin embargo, los Estados miembros, incluida España, aún no han incorporado plenamente esta definición en sus regulaciones nacionales.

Esta limitación puede distorsionar significativamente las predicciones entre edificios antiguos y modernos, ya que la falta de datos detallados sobre rehabilitaciones energéticas dificulta evaluar con precisión las mejoras en la eficiencia energética a lo largo del tiempo. En el caso de los edificios antiguos, la ausencia de información sobre si las rehabilitaciones califican como profundas (o incluyen mejoras energéticas) podría llevar a sobreestimaciones o subestimaciones de su desempeño energético.

A medida que las iniciativas de rehabilitación se extiendan por el parque edificado, estas variables serán esenciales para comprender con mayor precisión el consumo energético. Para garantizar el éxito futuro de herramientas como este modelo nUBEM, España debería integrar datos detallados sobre rehabilitaciones, alineados con la EPBD de 2024, en su catastro. Estas variables deberían indicar claramente qué rehabilitaciones califican como profundas según la definición de la EPBD. Además, deberían incluir información sobre otros niveles de mejora

energética, permitiendo una evaluación más granular del progreso del parque edificado hacia la descarbonización. La recopilación detallada de datos sobre los tipos de intervenciones en el parque edificado y su profundidad en materia energética será crucial para el desarrollo continuo de modelos UBEM precisos y útiles.

5.4.2. Limitaciones del modelo

Las limitaciones del modelo están condicionadas por las restricciones de acceso a datos, así como por la completitud y el nivel de detalle de estos. Por ejemplo, como se señala en [100], el País Vasco y Navarra mantienen sus propios catastros y conjuntos de datos del catastro INSPIRE, los cuales están excluidos de este modelo, lo que limita la cobertura geográfica. Además, la falta de datos detallados sobre los sistemas constructivos y los vectores energéticos representan una fuente significativa de desviación; incluirlos mejoraría sustancialmente la precisión del modelo.

Otro desafío es la presencia de registros mal etiquetados o erróneos en las bases de datos disponibles, especialmente en los CEE. Estas deficiencias requieren un exhaustivo proceso de filtrado, lo que introduce posibles errores en el algoritmo y afecta su precisión.

Al trabajar con modelos de IA, existe el riesgo de generar alucinaciones técnicas, siendo estas una de las principales limitaciones de los modelos actuales. Para minimizar el riesgo de que aparezcan estas alucinaciones se han optado por las técnicas desarrolladas en el apartado 5.2.6. Validación del modelo donde se desarrollan las métricas a emplear, el uso del NMBE, CV(RSME) y R^2 , las más empleadas en el campo, nos ayudan a estudiar la precisión del modelo, técnicas como la validación cruzada nos ayudan a prevenir o mitigar el over y under fitting, y el estudio de las gráficas de valores predichos vs valores de los CEE nos ayudan a conocer si ha habido tipologías que no están siendo bien predichas. Además de las variables estudiadas es particularmente relevante el uso de la validación cruzada, lo que permite analizar si este problema nos genera segmentos subrepresentados. Actualmente el overfitting, que sería la consecuencia de tener tipos de edificios que el modelo no puede representar adecuadamente, está en valores aceptables.

Además, la elección del propio algoritmo de cálculo de usar XGBoost favorece esto al ser un algoritmo que favorece la robustez del modelo, ya que se trata de un método basado en árboles de decisión en ensamble, lo que mejora la capacidad de generalización y reduce la probabilidad de extrapolaciones extremas en áreas con pocos datos.

Sin embargo, en trabajos futuros, sería valioso incorporar técnicas avanzadas con potencial de mejorar la robustez del modelo, como métodos de ensamblado

adicionales o redes adversariales, que permitan mejorar la detección y corrección de errores sistemáticos, especialmente en zonas rurales o con baja densidad de datos, donde la interpolación representa un mayor desafío.

Es debido a estas limitaciones que, aunque la validación del modelo es adecuada, las predicciones a nivel de edificio individual pueden no ser completamente fiables debido a la falta de datos sobre sistemas constructivos, el bajo porcentaje de edificios con CEE y las inconsistencias en los datos de los certificados. Por tanto, si bien el modelo es una herramienta robusta para analizar patrones y tendencias entre grupos de edificios en áreas o tipologías específicas, su idoneidad para análisis precisos a nivel de un único edificio es limitada.

5.5. Conclusiones del modelo

Este estudio propone el desarrollo de un modelo denominado nUBEM (*national-scale Urban Building Energy Model*), que, basado en las características físicas y geoespaciales de los edificios, es capaz de predecir el CEPNR y las emisiones de GEI mediante el uso de IA. Para ello, se entrenó el algoritmo XGBoost con un conjunto de datos que incluye todos los edificios residenciales en España que cuentan con un CEE y datos abiertos sobre sus características físicas y geoespaciales.

El modelo generado utiliza datos abiertos como entrada, procedentes del catastro español, el Catastro INSPIRE, MDT y estadísticas nacionales. Para el entrenamiento del modelo, se emplean el CEPNR y las emisiones de GEI de los CEE como variables objetivo. Toda esta información es proporcionada por fuentes gubernamentales abiertas y bajo los marcos comunes de diversas directivas europeas, lo que hace que el modelo sea potencialmente aplicable a todos los Estados Miembros de la UE que hayan implementado dichos marcos comunes.

Se observó que el uso de árboles de decisión potenciados por gradiente y, en particular, el algoritmo XGBoost ofrecen el mejor desempeño para este tipo de datos y propósitos, obteniendo mejores resultados en términos de NMBE, CV(RMSE) y R^2 en comparación con otras técnicas analizadas. Esto coincide con otros análisis similares que también identifican a los árboles de gradiente reforzado como los más efectivos para predecir el rendimiento energético de edificios [146].

El nUBEM demostró su capacidad para predecir con precisión el CEPNR y las emisiones de GEI de los edificios a escala nacional. A fecha 1 de enero de 2024, solo el 13,8% de los edificios residenciales en España cuentan con un CEE. Este modelo permite evaluar el rendimiento energético en todo el parque edificado

existente a nivel nacional, abarcando un total de 1.246.864 edificios como datos para aprender y 8,7 millones de edificios que es capaz de representar.

Al identificar los edificios menos eficientes, el modelo facilita el desarrollo de estrategias de rehabilitación específicas enfocadas en el 43% de los edificios residenciales con peor comportamiento energético, en línea con los requisitos del nuevo texto refundido de 2024 de EPBD. El nUBEM ha demostrado su eficacia como herramienta para generar indicadores de progreso que permiten analizar el parque residencial y su comportamiento energético, promoviendo políticas basadas en datos y planes efectivos de rehabilitación de edificios.

Además, los resultados obtenidos han demostrado ser precisos en comparación con la literatura científica existente, logrando resultados a escala nacional que superan los de estudios previos.

Aplicabilidad de los modelos

El capítulo 6 está basado en las siguientes publicaciones:

- Beltrán Velamazán, C.; Monzón Chavarriás, M.; López Mesa, B. A New Approach for National-Scale Building Energy Models Based on Energy Performance Certificates in European Countries: The Case of Spain. *Heliyon* **2024**, *10*, e25473. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25473>.
- Beltrán Velamazán, C.; Gómez Gil, M.; Monzón Chavarriás, M.; Espinosa Fernández, A.; López Mesa, B. Harnessing Open European Data for a Data-Driven Approach to Enhancing Decarbonization Measurement in the Built Environment. *Environmental and Climate Technologies* **2024**, *28*, 776–793. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2024-0060>.
- Beltrán Velamazán, C.; Monzón Chavarriás, M.; López Mesa, B. Predicting Energy and Emissions in Residential Building Stocks: National UBEM with Energy Performance Certificates and Artificial Intelligence. *Applied Sciences* **2025**, *15*, 514. <https://doi.org/10.3390/app15020514>.

Comunicaciones en congresos:

- Beltrán Velamazán, C.; Monzón Chavarriás, M.; López Mesa, B. Caracterización energética del parque edificado español a escala nacional a partir de datos en abierto: el caso de Zaragoza. En *Jornada de Jóvenes Investigadores del I3A*; Zaragoza, España, 26 de junio de 2024. <https://doi.org/10.26754/jjii3a.202410593>.

Y de capítulos del libro:

- Beltrán-Velamazán, C.; Monzón-Chavarriás, M.; López-Mesa, B. Clasificación y caracterización del parque habitacional en zonas rurales. En *RuralREGEN Estudio sobre el estado de la rehabilitación energética de viviendas en el ámbito rural en España: diagnóstico, barreras y soluciones*; ECODES - Fundación Ecología y Desarrollo: Madrid, España, 2022; pp. 17–38. ISBN 978-84-18321-64-1. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.20360.80647>.
- López-Mesa, B.; Beltrán-Velamazán, C.; Gómez-Gil, M.; Monzón-Chavarriás, M.; Espinosa-Fernández, A. New Approaches to Generate Data to Measure the Progress of Decarbonization of the Building Stock in Europe and Spain. En *Assessing Progress in Decarbonizing Spain's Building Stock: Indicators and Data Availability*; López-Mesa, B., Oregi, X., Eds.; Springer Nature Switzerland: Cham, Switzerland, 2024; pp. 317–346. ISBN 978-3-031-51829-4. https://doi.org/10.1007/978-3-031-51829-4_12.

6. Aplicabilidad de los modelos

En los capítulos anteriores se ha desarrollado la necesidad de medir los avances en rehabilitación y descarbonización del parque edificado, el estado de los indicadores de progreso y dos modelos UBEM a escala nacional, uno con toda la información existente en abierto y los datos de los CEE y otro aplicando IA para predecir el comportamiento energético del parque residencial completo.

Se va a analizar la capacidad de los modelos generados para ofrecer datos que permitan obtener información valiosa sobre el parque edificado.

Para ello, se va a evaluar el alcance de la investigación realizada para proporcionar datos útiles en la obtención de los indicadores de progreso de la EPBD de 2024.

Además, se va a estudiar el potencial de los modelos para, a través de diferentes análisis, obtener datos más desglosados y con mayor capacidad analítica sobre el parque edificado que los indicadores de progreso que plantea la EPBD.

En cada indicador de progreso se va a desglosar si se puede obtener de forma completa, parcial o es potencialmente calculable y sus razones, el modelo empleado, el potencial del indicador y las limitaciones que existen para obtenerlo, un gráfico o tabla desglosando los datos obtenidos y unas conclusiones sobre los datos.

Gracias a que los modelos son actualizables. Los datos de los capítulos 4 y 5 corresponden a los datos de la fecha de publicación de los artículos en que se basan, los resultados del capítulo 6 corresponden a los modelos actualizados a fecha de abril de 2024 que ya integran por ejemplo Madrid y Extremadura entre las comunidades autónomas que aportan los certificados de eficiencia energética.

6.1. Indicadores incluidos en la EPBD de 2024

De los 135 indicadores de progreso del texto refundido de la EPBD de 2024 [63], los que se corresponden con las áreas de interés de esta tesis, los indicadores sobre características físicas y energéticas del parque edificado son un total de 75 de ellos.

De esos 75 indicadores de progreso sobre estas temáticas:

- 25 indicadores, un 33,3%, se pueden calcular completamente mediante los modelos con los datos actualmente disponibles.
- Además, 20 indicadores, que representan el 26,7%, son potencialmente calculables a través de los modelos. Sin embargo, esto implica la

necesidad de o bien comparar dos modelos, por ejemplo, a inicio y final de año para ver la cantidad de edificios rehabilitados ese año, o requiere del uso de información que actualmente no está disponible en abierto, pero sería directamente incorporable a los modelos si se incorporase. Un ejemplo de esto es el vector energético, información existente en los archivos XML de los CEE y que algunas, pero no todas las CCAA publican en abierto, por lo que no es actualmente obtenible a escala nacional.

- Por otro lado, un 32%, es decir 24 indicadores, son parcialmente obtenibles. Se trata en su mayoría de los relacionados con la determinación de los objetivos de la hoja de ruta de la rehabilitación. Aunque el modelo puede aportar información valiosa para tomar decisiones basadas en datos, establecer los objetivos requiere de un estudio pormenorizado y específico de cada uno.
- Finalmente, seis indicadores de progreso no pueden ser obtenidos con los modelos, principalmente por tratar de temáticas que no se pueden obtener con modelos, tales como aportar una definición de edificio de consumo de energía casi nulo o los relativos a la pobreza energética por requerir de unos datos que quedan fuera del objetivo actual de estos modelos.

Una limitación relevante que se debe tener en cuenta es que estos datos no incluyen las CCAA de País Vasco y Navarra por no estar incluidas en el catastro español ni en el catastro INSPIRE. Aun con esta limitación se considera que la obtención de estos resultados es de utilidad para medir y fomentar el progreso de la descarbonización y la rehabilitación energética del parque edificado nacional.

a) Visión general del parque inmobiliario nacional

Los indicadores de este dominio incluyen la descripción de las características del parque edificado y el progreso de la certificación energética, entre otros. Este es el dominio más numeroso y sobre el que los modelos pueden generar la mayor cantidad de información, ya que permiten describir con precisión el parque edificado.

Algunos indicadores de progreso requieren definir aspectos específicos. Por ejemplo, en ciertos casos se debe precisar qué es un Edificio de Consumo de Energía Casi Nulo (EECN) o identificar cuáles son los edificios menos eficientes. En cada caso, se incluye el criterio utilizado, junto con las fuentes o argumentos en que se basa.

Cada indicador se aporta en las unidades que especifica el listado de indicadores de la EPBD de 2024: la superficie total se expresa en m², el consumo

anual de energía primaria y final y el ahorro de energía en ktep (kilotonelada equivalente de petróleo), el uso medio de energía primaria en kWh/(m²a), las emisiones de gases de efecto invernadero operativas anuales kg de CO₂eq/(m²a).

6.1.1. Número de edificios y superficie total: por tipo de edificio

El indicador se puede proporcionar de forma prácticamente completa. Sin embargo, el indicador detalla que deben especificarse los edificios públicos y las viviendas sociales y no es posible identificarlos, ya que el modelo carece de información sobre la titularidad de los edificios, al ser este dato considerado como información protegida. En cambio, el gobierno sí podría obtener el indicador completo empleando el modelo del capítulo 4 y complementando la información con el dato de la titularidad.

La consideración de tipo de edificio puede ser muy variable, ya que la directiva europea no aporta una definición ni consideraciones sobre qué considera como tipo de edificio, se aportan dos posibilidades:

- Considerando como tipo de edificio la clasificación que realiza actualmente la ERESEE por tipo de edificio (Uu – unifamiliar, Cc – Bloque plurifamiliar de 3 o menos plantas, Bb – Bloque plurifamiliar de 4 o más plantas y se añade en este caso Tt – Edificios de uso no residencial) y combinado con el periodo de construcción al que se han añadido los posteriores al CTE según las diferentes actualizaciones de la norma en materia energética. Los resultados se muestran en la tabla 21.
- Considerando como tipo de edificio el uso principal del edificio. Los resultados se muestran en la tabla 22.

Como se puede apreciar en la tabla 21, el tipo de edificio más común corresponde a las unifamiliares, ocupando las 4 categorías más numerosas las tipologías de unifamiliares construidas hasta 2007. Sin embargo, en cuanto a la superficie construida, la tipología más numerosa es la de bloques altos de vivienda plurifamiliar construidos entre 1981 y 2007, seguido del uso no residencial y de las unifamiliares del mismo periodo. Respecto al total de los edificios de España, un 68,9% son unifamiliares, un 5,6% son bloques plurifamiliares de 3 alturas o menos, un 6,2% son bloques plurifamiliares de 4 o más plantas y un 19,3% son edificios de uso no residencial. Estos datos varían notablemente en cuanto a la superficie edificada que ocupan, con un 31,8% de los m² las unifamiliares, un 9,4% los bloques plurifamiliares bajos, un 31,2% son bloques plurifamiliares altos y un 27,5% los edificios de uso no residencial.

Tabla 21. Número de edificios y superficie total (m²) por tipo de edificio y periodo de construcción. Uu – unifamiliar, Cc – Bloque plurifamiliar de 3 o menos plantas, Bb – Bloque plurifamiliar de 4 o más plantas, Tt – Edificios de uso no residencial. Elaboración propia.

Tipo de edificio	Número de edificios	Superficie total (m ²)
Uu <1940	2.132.934	490.386.207
Uu 41-60	930.924	193.290.070
Uu 61-80	1.457.066	326.954.471
Uu 81-07	2.460.354	587.678.425
Uu 08-13	273.216	72.511.956
Uu 14-17	59.677	16.410.392
Uu 18-19	32.299	8.854.109
Uu 20-24	66.344	19.807.751
Cc <1940	91.812	36.665.946
Cc 41-60	72.172	26.708.222
Cc 61-80	150.487	71.844.629
Cc 81-07	252.491	301.486.312
Cc 08-13	31.473	53.458.008
Cc 14-17	2.954	4.945.488
Cc 18-19	2.025	3.915.994
Cc 20-24	4.558	9.483.815
Bb <1940	48.271	50.879.504
Bb 41-60	57.538	72.805.783
Bb 61-80	278.012	569.608.201
Bb 81-07	239.544	795.098.655
Bb 08-13	31.813	135.052.272
Bb 14-17	2.877	14.969.551
Bb 18-19	2.164	11.725.017
Bb 20-24	5.301	31.712.053
Tt <1940	761.813	216.335.331
Tt 41-60	203.243	87.682.996
Tt 61-80	371.701	297.483.752
Tt 81-07	596.619	664.090.338
Tt 08-13	96.854	137.669.539
Tt 14-17	26.683	33.613.035
Tt 18-19	9.313	15.681.241
Tt 20-24	12.925	28.901.374
Total	10.765.457	5.387.710.437

Como se puede apreciar en la tabla 22, el uso predominante con gran diferencia es el de residencial, constituyendo un 71,2% de los edificios de España y un 73% de su superficie edificada. En esta tabla se muestra el total de los edificios nacionales, a excepción de Navarra y País Vasco, si bien, de cara a la descarbonización del parque edificado hay que destacar que no todos los usos requieren de climatización. Son los usos de comercial, cultural, deportivo, singular, espectáculos, ocio y hostelería, oficinas, religioso, residencial y salud y beneficencia los que poseen espacios que lo requieren. Estos usos constituyen el 74,3% y el 76,5% de los edificios y superficie total edificada respectivamente.

Tabla 22. Número de edificios y superficie total (m²) por uso principal del edificio.
Elaboración propia.

Uso del edificio	Número de edificios	Superficie total (m ²)
Agrario	16.050	8.665.775
Almacén- Estacionamiento	2.424.440	1.111.052.828
Comercial	88.035	45.731.302
Cultural	35.989	18.064.985
Deportivo	102.156	52.877.250
Edificio singular	15.653	8.164.949
Espectáculos	6.630	3.317.161
Industrial	292.333	145.083.770
Industrial agrario	2.984	1.384.042
Ocio y Hostelería	54.844	28.048.698
Oficinas	19.867	10.401.383
Religioso	22.668	11.443.615
Residencial	7.661.038	3.931.446.041
Sanidad y Beneficencia	22.770	12.028.638
Total	10.765.457	5.387.710.437

Este indicador de progreso es obtenible a través del modelo basado en CEE y datos en abierto del capítulo 4, ya que el catastro alfanumérico aporta esta información y a través del modelo generado es fácilmente recopilable y tratable en su conjunto. Como puede apreciarse, el indicador da una visión general del parque edificado nacional, si bien la falta de una definición acerca de los tipos de edificios hace que sea ambiguo pudiendo variar considerablemente según se defina de una u otra forma. Este indicador presenta una información útil y

valiosa para caracterizar el parque edificado, y como se verá en el siguiente apartado del capítulo, posee un alto potencial de desglose con más información para representar, por ejemplo, las diferencias en cuanto a tipologías y fechas de construcción en el parque edificado urbano y rural, o por zonas climáticas, lo que tiene profundas implicaciones en cuanto a la demanda energética que requieren.

Este indicador con la información en abierto disponible no presenta limitaciones para su creación más allá de la determinación de los edificios públicos, sin embargo, sería positivo si se aportasen los datos a través de una API del catastro, haciendo el proceso ETL más sencillo y optimizado.

6.1.2. Número de edificios y superficie total: por clase de eficiencia energética

El indicador se puede dar completo a partir del modelo nUBEM del capítulo 5. Estos datos son predicciones que el modelo ha generado empleando las variables del capítulo 5 sobre el parque edificado residencial. Este indicador complementa los relativos al estado de la certificación energética incluidos también en la directiva EPBD, y permite dar una visión más amplia sobre la totalidad del parque edificado.

El indicador aporta información útil a escala nacional, si bien tiene un amplio potencial para desglosarse por tipología de edificio, por zona climática, por zonas rurales o urbanas y analizar su distribución para medir las diferentes características del parque edificado de forma más precisa. La principal limitación es que los datos indicados son relativos al parque residencial debido a que no existen suficientes CEE sobre uso no residencial para entrenar un algoritmo que represente adecuadamente toda la variabilidad de usos y casuísticas diversas que requiere el uso no residencial. Como se puede apreciar en la tabla 23, la gran masa de edificios se encuentra en las 4 peores letras energéticas de emisiones de GEI y especialmente en la clase energética E, con un número de edificios y de superficie total del 81,3% y 83,5% del parque edificado. Estos datos ponen de manifiesto la necesidad de intervenir decididamente en el parque existente, actualmente con un 93,3% de los edificios en las tres peores clases energéticas.

Se considera que el potencial de este indicador aumentaría significativamente si se desglosara de distintas maneras. Esto permitiría conocer con mayor detalle el parque edificado y respaldaría la toma de decisiones sobre las estrategias de intervención, facilitando la identificación de los segmentos menos eficientes, su ubicación y sus características.

Tabla 23. Indicadores de progreso: Número de edificios y superficie total (m²) por clase emisiones de GEI. Elaboración propia.

Clase de eficiencia energética	Número de edificios	Superficie total (m ²)
A	15.474	6.214.555
B	54.396	23.280.421
C	79.210	32.594.034
D	711.294	190.293.640
E	7.124.089	2.267.940.653
F	458.036	79.337.176
G	236.597	80.209.316

6.1.3. Número de edificios y superficie total: edificios de consumo de energía casi nulo

El número y la superficie de los Edificios de Consumo de Energía Casi Nulo (EECN) pueden estimarse, con algunas limitaciones, a partir del modelo basado en CEE y datos en abierto.

El indicador especifica que se incluya una definición de EECN, en este caso se emplea la definición recogida en la legislación española. El Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE) del Código Técnico de la Edificación (CTE) define los EECN desde su modificación en 2017. Y en 2019 se modifica la definición y se establecen unos criterios más claros para determinar los EECN provenientes de rehabilitaciones de edificios existentes.

Con base en estas definiciones, todos los edificios de obra nueva construidos a partir del año 2018, con la modificación de 2017 en vigor desde el 23 de junio de 2017 [240], eran EECN.

Además de los edificios de obra nueva, en la modificación de 2019 se incorpora que los edificios rehabilitados puedan ser considerados EECN si cumplen con las condiciones exigibles a los edificios de obra nueva relativos a:

- El valor límite de consumo de energía primaria no renovable (CEPNR), correspondiente a obra nueva especificado por zona climática de invierno.
- El valor límite de consumo de energía primaria total, correspondiente a obra nueva especificado por zona climática de invierno.

Estos valores límite varían según el uso del edificio, residencial privado u otros usos, y deben cumplirlos tanto los edificios de obra nueva como los rehabilitados para ser considerados EECN.

En la tabla 24 se indican los valores límite de CEPNR para ser considerado EECN en uso residencial privado. En otros usos el valor límite depende de la carga interna del edificio, lo que hace que requiera un estudio detallado caso por caso.

Tabla 24. Valor límite $C_{ep,nren,lim}$ [kW·h/m²·año] para uso residencial privado para ser considerado EECN. En territorio extrapeninsular (Illes Balears, Canarias, Ceuta y Melilla) se multiplicarán los valores de la tabla por 1,25. Datos extraídos del CTE DB-HE [180]. Elaboración propia.

Zona climática	Zona climática de invierno					
	α	A	B	C	D	E
Edificios nuevos y ampliaciones	20	25	28	32	38	43

Mediante el modelo desarrollado basado en datos en abierto, se pueden identificar tanto los edificios construidos a partir de 2018 como los edificios de uso residencial privado anteriores a esta fecha que cumplen con los criterios de CEPNR establecidos en la tabla 24.

Del valor límite de consumo de energía primaria total no es posible comprobar su cumplimiento al no ofrecer ese valor en abierto en los CEE. Sin embargo, al ser el valor límite de CEPNR el factor más limitante, se considera que la aproximación realizada es adecuada.

Analizando los resultados obtenidos del modelo, el total de edificios construidos entre 2018 y 2024 es de 112.652 edificios de uso residencial privado y 10.385 edificios de uso no residencial con usos que requieren de climatización.

Además, el número de edificios residenciales privados anteriores a 2018, con un CEE que cumple con los requisitos indicados en la tabla 24 es de 22.737 edificios en España, 4.786 en clima extrapeninsular y 17.951 en clima peninsular, ocupando en total una superficie construida de 14.622.314 m². Estos datos corresponden con los edificios anteriores a 2018 que disponen de al menos un CEE en vigor que está por debajo de los valores correspondientes para su zona climática y si es territorio peninsular o extrapeninsular.

De estos 22.737 edificios anteriores a 2018, 3.716 se construyeron entre 2008 y 2017, con el CTE de 2008 o sucesivos en vigor y corresponderían a edificios construidos en su momento con ya un fuerte énfasis en la eficiencia energética más allá de lo que se les exigía, y 19.021 edificios fueron edificados antes del CTE de 2008 y se considera que cumplen estos valores gracias a una rehabilitación energética.

En conclusión, estos resultados obtenidos indican que el número de EECN en España son 135.389 edificios de uso residencial privado, compuestos por 112.652 construidos entre 2018 y 2024, 3.716 construidos antes del CTE de 2017

pero con un fuerte énfasis en la eficiencia energética y 19.021 edificios anteriores a 2008 que han sido rehabilitados energéticamente.

Ocupando una superficie de 58.399.040 m² construidos los EECN de uso residencial privado de obra nueva tras 2017, 2.340.395 m² los edificios construidos entre 2008 y 2017 que cumplen los criterios actuales para ser un EECN, 12.281.919 m² construidos los EECN de uso residencial privado de rehabilitación de edificio existente. Un dato que no se solicita actualmente, pero se considera relevante es dar el número de viviendas en EECN, siendo de 547.031 viviendas, 414.851 de ellas de obra nueva posteriores a 2018, 17.082 viviendas construidas entre 2008 y 2017 y 115.098 viviendas rehabilitadas energéticamente.

Resulta notable la diferencia entre zonas climáticas que hay en los criterios para ser considerado EECN y en la normativa de los CEE que regula las clases energéticas. Al analizar estos valores en residencial plurifamiliar peninsular, figura 28 del capítulo 5, se aprecia cómo en la zona climática A3 un edificio puede ser hasta una letra C y ser EECN, mientras que en el resto de las zonas climáticas un EECN puede tener clase energética B y en la zona climática E solamente pueden ser clase A únicamente.

Este indicador tiene un gran potencial de mejora en su recopilación a futuro, ya que la calidad de este indicador podría mejorar fácilmente si se aportasen los datos de consumo de energía primaria total que están recogidos en una variable interna del CEE en abierto.

6.1.4. Número de edificios y superficie total: edificios menos eficientes

El indicador puede obtenerse a través del modelo desarrollado en el capítulo 5. El cual permite clasificar los edificios según su consumo de energía primaria no renovable y, de ese modo, identificar las tipologías y las características de los segmentos menos eficientes del parque edificado.

El indicador solicita una definición de edificios menos eficientes, se ha optado por considerar como los edificios menos eficientes al 15% de los edificios con peor comportamiento energético. Se opta por este número en contraposición al 15% más eficiente que establece el Reglamento Delegado (UE) 2021/2139, definidos como Contribución sustancial a la mitigación del cambio climático y que se solicitan en otro de los indicadores de progreso. De esta forma se puede comparar la diferencia de resultados entre los valores más y menos eficientes del parque edificado.

En la tabla 25 se desglosa el valor límite para que un edificio esté comprendido dentro del top 15% de edificios con mayor CEPNR, a escala nacional y por zonas climáticas. El valor a escala nacional es de 315,6 kWh/m²a,

sin embargo, este valor al depender significativamente de la demanda que implica estar situado en una zona climática u otra no resulta representativo del parque edificado, sino que resulta más útil conocer su desglose por zonas climáticas para poder comparar dos edificios en la misma zona e identificar adecuadamente cuáles son los menos eficientes en cada clima. El 15% menos eficiente en España lo constituyen 1.301.864 edificios, con 145.006.839 m² y 1.512.603 viviendas.

Tabla 25. Valor límite de CEPNR (kWh/m²a) del 15% de los edificios residenciales con peor comportamiento energético por zona climática. Elaboración propia.

Zona climática	Valor límite 15% peor comportamiento energético
Alpha3	150,7
A2	179,0
A3	179,0
A4	183,4
B3	231,5
B4	230,0
C1	288,0
C2	275,1
C3	255,4
C4	267,5
D1	334,5
D2	329,8
D3	324,1
E1	362,8
Global	315,6

El indicador presenta una potencialidad importante para definir claramente los edificios más necesitados de una intervención en materia energética. De manera análoga al indicador anterior, podría desglosarse la información para ver qué características presentan los edificios con peor comportamiento, poder localizarlos y trazar estrategias específicas para incidir en los sectores con peor comportamiento energético del parque edificado. No presenta limitaciones más allá de las comentadas acerca de que el modelo del capítulo 5 solamente hace referencia al uso residencial, si bien a futuro esto podría resolverse con un modelo que integrase los datos no residenciales.

6.1.5. Número de edificios y superficie total: el 43% de los edificios residenciales menos eficientes

El indicador es posible obtenerlo a través del modelo desarrollado en el capítulo 5. A escala nacional se obtiene que el valor límite de CEPNR para considerar que un edificio está en el 43% de los edificios con peor comportamiento energético es de 251,3 kWh/m²a, quedando 3.732.011 edificios incluidos, lo que supone 618.656.889 m² y 5.820.298 viviendas. Sin embargo, este valor no resulta adecuado analizarlo sin un contexto apropiado, ya que la zona climática es un factor determinante en la demanda, consumo y emisiones de un edificio. De este modo su análisis de forma nacional deja a la mayor parte de los edificios en las zonas climáticas frías dentro de ese 43%, ya que los de las zonas cálidas poseen unas necesidades de calefacción mucho menores.

Este indicador desglosado por zonas climáticas, como se muestra en la tabla 26, aporta mucha más información sobre el 43% de los edificios con peor comportamiento energético en España. Este valor varía considerablemente según la zona climática en que se encuentra.

Tabla 26. Valor límite de CEPNR (kWh/m²a) del 43% de los edificios residenciales con peor comportamiento energético por zona climática. Elaboración propia.

Zona climática	Valor límite 43% peor comportamiento energético
Alpha3	125,4
A2	148,6
A3	146,9
A4	153,4
B3	194,1
B4	192,1
C1	250,0
C2	229,3
C3	220,1
C4	230,8
D1	293,7
D2	284,7
D3	278,8
E1	328,3
Global	251,3

6.1.6. Número de edificios y superficie total: edificios de uso religioso

El nombre completo del indicador es ‘Número de edificios y superficie total (m²): proporción prevista de edificios exentos con arreglo al artículo 9, apartado 6, letra b)’. El artículo de la EPBD de 2024 hace referencia a que los EM pueden eximir de los estándares mínimos de eficiencia energética a los edificios utilizados como lugares de culto y para actividades religiosas. Este indicador posible obtenerlo ya que el uso está desglosado en el modelo del capítulo basado en CEE y datos en abierto.

El número de edificios con uso religioso en el modelo es de 22.668 edificios que abarcan 11.443.615 m² de superficie construida.

6.1.7. Número de edificios y superficie total: por antigüedad del edificio

Este indicador de progreso es calculable a través del modelo basado en CEE y datos en abierto. Los datos que emplea corresponden a los aportados en el catastro alfanumérico y es un indicador de fácil obtención gracias a los datos en abierto catastrales. En cuanto al estado de la edificación se ha creado una clasificación por antigüedad que se muestra en la tabla 27.

Tabla 27. Número de edificios y superficie total (m²) por antigüedad del edificio.
Elaboración propia.

Antigüedad del edificio	Número de edificios	Superficie total (m ²)
Menor a 5 años	66.706	67.372.346
Entre 5 y 10 años	110.098	96.888.676
Entre 10 y 15 años	179.162	142.240.198
Entre 15 y 20 años	615.419	570.413.707
Entre 20 y 30 años	1.443.378	1.056.217.016
Entre 30 y 40 años	1.214.089	709.456.476
Entre 40 y 50 años	1.342.588	730.458.409
Entre 50 y 60 años	1.132.985	673.865.525
Entre 60 y 70 años	907.870	342.781.975
Entre 70 y 80 años	575.176	163.101.818
Entre 80 y 90 años	505.328	131.302.150
Entre 90 y 100 años	360.924	93.840.138
Mayor a 100 años	2.311.734	609.772.003

En ella se aprecia la ralentización en la construcción en los últimos 15 años, del 2010 a la actualidad, apreciándose como se ha construido un 57% de lo que se construyó en el lustro anterior (2005-2010) y en conjunto en los últimos 20 años se ha edificado menos que en cualquiera de las cuatro décadas anteriores.

Esto es relevante especialmente por el envejecimiento del parque edificado, con una gran masa de edificios envejecidos, pero además por la gran cantidad de edificios que se encuentran en la mitad de su vida útil o cercanos a ella.

Actualmente muchas de las rehabilitaciones que se realizan corresponden con el segmento del parque edificado que ha pasado la mitad de su vida útil, 50 años, lo que incluye los edificios de las décadas 1950-1960-1970, correspondientes con las categorías con antigüedad entre 70 y 80 años, entre 60 y 70 años y entre 50 y 60 años respectivamente. Sin embargo, hay una gran masa de edificios de las categorías inmediatamente más jóvenes, que para el 2050 también habrán alcanzado la mitad de su vida útil y requerirán de cada vez más intervenciones relativas a la eficiencia energética, la accesibilidad y la funcionalidad para mantener su habitabilidad y uso en óptimas condiciones, aumentando en 4 millones el número de edificios que habrán pasado la mitad de su vida útil. Esto pone de relieve la importancia de promover la rehabilitación, un sector de la construcción que cada vez va a tener que dar respuesta a unas necesidades mucho mayores de demanda de actuaciones.

Este indicador es muy relevante debido a la clara implicación que tiene la edad del edificio con la necesidad de adaptarlo a los requisitos en materia energética, de accesibilidad, salubridad y seguridad. Podría proporcionar una información interesante desglosado por periodos de normativa de construcción, esto lo encontramos realizado en la clasificación por tipo de edificio, por lo que se ha optado por clasificarlo de forma diferente. Estudiando la distribución de edificios por su antigüedad, pero dividiendo el parque edificado en función de las regulaciones que estaban en vigor en su momento en materia energética, se aprecia que un 0,83% del parque edificado con la modificación del CTE de 2019 en vigor, la más estricta hasta la fecha, y un 6,14% del parque fue edificado después de la entrada en vigor del CTE.

6.1.8. Número de edificios y superficie total: por tamaño del edificio

Este indicador de progreso es calculable a través del modelo del capítulo 4. No existe una clasificación concreta para estudiar el tamaño del edificio, se ha optado por clasificar el parque edificado en función de su superficie edificada.

En la tabla 28 se aprecia como los edificios más numerosos en cantidad y superficie son los de tamaño comprendido entre 100 y 500 m², seguidos por los

de tamaño menor a 100 m² por número de edificios y por los de entre 1000 y 5000 m² por superficie.

Tabla 28. Número de edificios y superficie total (m²) por tamaño del edificio.
Elaboración propia.

Tamaño del edificio	Número de edificios	Superficie total (m ²)
Muy Pequeño (< 100 m ²)	2.070.285	127.678.279
Pequeño (< 500 m ²)	7.117.135	1.636.838.090
Mediano Pequeño (< 1000 m ²)	792.571	540.027.982
Mediano (< 5000 m ²)	645.669	1.365.152.644
Mediano Grande (< 10000 m ²)	90.882	624.777.426
Grande (< 20000 m ²)	34.920	474.894.015
Muy Grande (< 50000 m ²)	11.836	336.063.289
Excepcionalmente Grande (< 100000 m ²)	1.454	96.231.765
Colosal (> 100000 m ²)	705	186.046.947

El indicador proporciona una información complementaria acerca de los edificios, si bien a escala nacional no se aprecia un potencial muy elevado en su obtención. Se sugiere que dar el desglose por tamaño de las viviendas en lugar de los edificios podría dar una información más relevante para caracterizar el parque edificado y sus condiciones, lo que ligado a otros datos como el tipo de edificio y su comportamiento energético pueda apoyar el estudio de las características habitacionales en barrios y ciudades y apoyar la toma de decisiones basada en datos.

El indicador no presenta limitaciones en su obtención.

6.1.9. Número de edificios y superficie total: por zona climática

Este indicador se puede obtener completo a través del modelo del capítulo 4. Permite conocer dónde se encuentra la mayor parte del parque edificado y por tanto sus necesidades de climatización debido a la mayor o menor rigurosidad del clima en cada zona.

En la tabla 29 se muestra cómo la mayor parte de los edificios se encuentran en las zonas climáticas más frías, letras D y E, un 50,6% de los edificios, zonas que requieren de unas demandas de calefacción muy superiores al resto. Y un 58,1% de los edificios se encuentran en las zonas de verano más exigentes,

números 3 y 4. Aunque analizando los resultados obtenidos en otros indicadores, la zona climática de verano posee una implicación mucho menor en el consumo y las emisiones que la de invierno.

Tabla 29. Número de edificios y superficie total (m²) por zona climática. Elaboración propia.

Zona climática	Número de edificios	Superficie total (m ²)
Alpha3	251.014	154.713.603
A2	87.332	31.998.891
A3	236.074	170.531.359
A4	131.176	84.182.375
B3	750.551	488.349.444
B4	841.687	411.884.988
C1	461.895	252.826.342
C2	607.005	482.616.239
C3	1.031.082	511.107.330
C4	922.026	321.704.656
D1	587.717	259.116.449
D2	1.108.404	464.973.272
D3	2.091.703	1.229.294.755
E1	1.657.791	524.410.734

En la figura 34 se muestra el mapa de zonas climáticas, realizado de acuerdo con lo indicado en el CTE DB-HE [180], superponiendo el modelo del capítulo 4, en esta figura se ilustran los datos a los que hace referencia la tabla 29. Se puede apreciar cómo las zonas frías, D y E incluyen una muy amplia superficie del territorio español y abarcan la práctica totalidad del interior, excepto la zona de Extremadura. Las zonas de costa del norte peninsular están formadas principalmente por zonas C1 a C3, y Andalucía y el territorio extra peninsular está compuesto principalmente por los climas A y B, siendo el clima Alpha3 ($\alpha 3$) exclusivo de la zona de costa de las Islas Canarias.

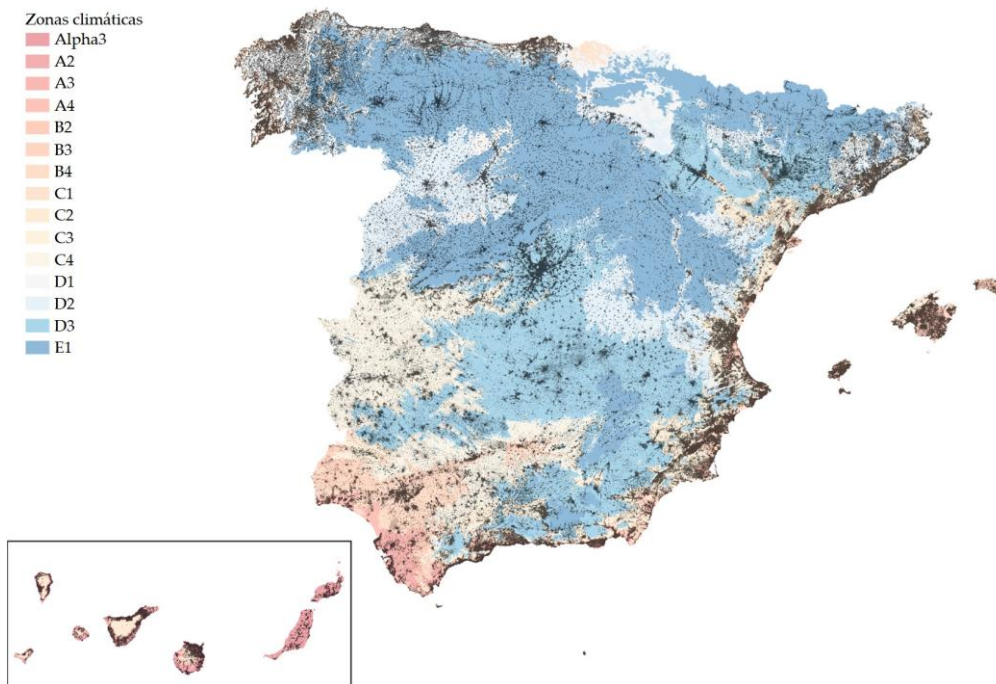


Figura 34. Mapa de zonas climáticas y edificios de España. Elaboración propia, adaptada de [100].

Aunque el indicador es totalmente desarrollable, existen importantes limitaciones que complican mucho su obtención y que han tenido que ser resueltas en esta investigación para poder lograrlo. La principal es que es una variable no recogida a escala edificio en ninguna base de datos como el catastro. Esto implica que debe ser calculada en el modelo, lo que aumenta su complejidad, tiempo y recursos necesarios. La otra limitación es que actualmente no está disponible ningún mapa donde obtener estas zonas climáticas, sino que debe crearse a partir de la información disponible en el CNIG y el anexo del CTE DB-HE que indica la relación entre las provincias, la altura respecto al nivel del mar y la zona climática que le corresponde. Esto conlleva que en primer lugar debe construirse este mapa y luego realizar una unión espacial de los edificios con el mapa para poder obtener este valor, lo que es una operación altamente costosa y complica mucho la obtención del indicador.

Este indicador opcional de la EPBD de 2024 ofrece una información clave para poder estudiar adecuadamente el comportamiento energético de los edificios. Como se desarrollará en el siguiente apartado de este capítulo, si además se desglosa por otros factores como: el tipo de edificio, el uso, el periodo de construcción, entre otras posibilidades, su utilidad se multiplica. La zona climática del edificio resulta fundamental para comprender adecuadamente el comportamiento energético del edificio, siendo por mucho la variable más importante en el algoritmo del capítulo 5, (véase sección 5.5.1.), y es un dato

fundamental en la práctica totalidad de los indicadores para poder caracterizar el parque edificado de forma adecuada.

6.1.10. Número de edificios y superficie total: demoliciones

Este indicador es potencialmente calculable comparando dos modelos entre los que haya habido un tiempo para poder estudiar la variación entre los edificios registrados. Sin embargo, requiere del paso del tiempo para poder compararlos.

6.1.11. Número de certificados de eficiencia energética: por tipo de edificio

El dato es posible obtenerlo empleando el modelo del capítulo 4, si bien se solicita el desglose de los edificios públicos y no es posible obtenerlo debido a que la titularidad al ser un dato protegido no está disponible. El gobierno podría emplear esta herramienta complementando la información para poder obtener el indicador completo.

En total en el modelo hay 4.858.767 de CEE publicados en bases de datos en abierto, sin embargo, después de filtrados y comprobaciones quedan 3.410.566 CEE válidos, que corresponden a 1.438.408 edificios certificados. En la tabla 30 se aportan los datos desglosados por tipo de edificio de la clasificación de la ERESEE incluyendo el uso no residencial.

Este indicador es relevante para conocer el avance de la certificación energética en el país, y al desglosarlo por tipo de edificio se puede conocer cómo está siendo su avance. Posibles potencialidades incluirían el desglosar el porcentaje de cada clase energética por tipo de edificio, sus consumos y emisiones medias, y también poner estos datos en relación con el total de edificios y superficie edificada de cada tipo de edificio, lo que puede dar una idea aproximada de sus consumos y emisiones. En el apartado siguiente se muestra el resultado de desglosar este indicador con más datos para caracterizar el parque edificado.

El indicador presenta algunas limitaciones respecto a la información en abierto disponible. Aunque cada vez se ofrecen más y mejores datos en abierto de los CEE, todavía algunas CCAA no ofrecen sus datos en abierto, con lo que hay CEE que no están en abierto y por tanto fuera de los datos que pueden aportar los modelos. Otra limitación es la propia calidad de los CEE, como se indica en el capítulo 4 un importante porcentaje de los CEE contiene errores o datos poco realistas, lo que implica que sean descartados del proceso, pero son en la actualidad CEE registrados. Esto genera discrepancias entre el total de CEE que se recogen en el modelo y el total de datos disponibles en las bases de datos en abierto.

Tabla 30. Número de certificados de eficiencia energética: por tipo de edificio. Elaboración propia.

Tipo de edificio	Número de CEE
Uu <1940	144.680
Uu 41-60	77.689
Uu 61-80	161.357
Uu 81-07	276.772
Uu 08-13	30.877
Uu 14-17	9.781
Uu 18-19	8.451
Uu 20-24	21.242
Cc <1940	30.778
Cc 41-60	30.559
Cc 61-80	89.489
Cc 81-07	344.256
Cc 08-13	68.200
Cc 14-17	2.626
Cc 18-19	1.119
Cc 20-24	2.601
Bb <1940	87.522
Bb 41-60	121.447
Bb 61-80	840.814
Bb 81-07	823.260
Bb 08-13	152.514
Bb 14-17	3.606
Bb 18-19	1.238
Bb 20-24	2.242
Tt <1940	7.322
Tt 41-60	4.164
Tt 61-80	17.568
Tt 81-07	39.391
Tt 08-13	6.142
Tt 14-17	1.136
Tt 18-19	575
Tt 20-24	1.145
Total	3.410.563

6.1.12. Número de certificados de eficiencia energética: por clase de eficiencia energética

El dato es posible obtenerlo empleando el modelo del capítulo 4. Se aportan los datos por clase de eficiencia energética por emisiones de GEI en la tabla 31. Con base en estos datos, un 56,9% de los CEE pertenecen a la clase energética E y un 76,4% se encuentran en las tres peores clases energéticas. Estos resultados son coherentes con los datos publicados en el informe del Estado de la certificación energética de los edificios [215], y muestran la necesidad de intervenir en el parque edificado.

Tabla 31. Número de certificados de eficiencia energética: por clase de eficiencia energética.
Elaboración propia.

Clase de eficiencia energética	Número de CEE
A	47.975
B	66.207
C	181.811
D	508.438
E	1.941.070
F	316.272
G	348.790
Total	3.410.563

Resulta interesante comparar estos datos, ya de por sí con alta presencia de las tres peores clases energéticas (E, F y G), con el indicador de número de edificios y superficie por clase de eficiencia energética desarrollado anteriormente empleando el modelo predictivo del capítulo 5. Se aprecia algo que era esperable, las clases energéticas más eficientes: la clase A con un 1,4% de los CEE, B 1,9% y C 5,3%, que son las clases menos numerosas de los CEE, se encuentran además sobre representadas en este indicador. Esto se debe a que los edificios nuevos se les requiere presentar un CEE al construirse y los edificios existentes al alquilarse, venderse o intervenir sobre ellos si reciben ayudas públicas, por lo que los edificios nuevos sí están en gran parte certificados y los existentes solamente una fracción de ellos. En el subapartado 6.2.4. se muestra un análisis de esta proporción de CEE registrados respecto al total de edificios de cada tipología de edificios. El indicador presenta las mismas limitaciones que el apartado anterior.

6.1.13. Número de certificados de eficiencia energética: por período de construcción

El número de CEE por periodo de construcción se puede obtener de manera análoga al resto de indicadores de CEE empleando el modelo del capítulo 4.

El desglose del indicador de la tabla 32 muestra como actualmente la mayor parte de los CEE corresponden a edificios construidos entre 1961 y 2007, acumulando el 76% de los CEE del modelo.

Tabla 32. Número de certificados de eficiencia energética: por período de construcción.
Elaboración propia.

Período de construcción	Número de CEE
<1940	270.302
1941-1960	233.859
1961-1980	1.109.228
1981-2007	1.483.679
2008-2013	257,733
2014-2017	17,149
2018-2019	11,383
2020-2024	27,230
Total	3.410.563

Este indicador tiene un potencial interesante para enfatizar la importancia de la obligatoriedad de certificar el edificio para alquilarlo, venderlo u obtener ayudas a la subvención, ya que la gran masa de CEE registrados corresponde a edificios que se certifican por esas necesidades. La mayor proporción de certificados en esas fechas de construcción es coherente con el mayor número de edificios en esas tipologías. Como potencialidades, las ya mencionadas de desglosar estos datos en sus calificaciones energéticas y de GEI obtenidas y en comparar estos valores respecto al total de edificios de la tipología ayudaría a dar una idea más precisa del estado de la certificación energética, como se desarrollará en el siguiente apartado. Las limitaciones del indicador son las mismas de los indicadores anteriores sobre el estado de la certificación energética.

6.1.14. Tasas de renovación anuales: número y superficie total

Este subapartado engloba los indicadores relativos a las tasas de renovación anuales, de las que se solicita el número y la superficie total por: tipo de edificio, edificios transformados en edificios de consumo de energía casi nulo o en edificios de cero emisiones, por profundidad de renovación (renovación media ponderada) y en edificios públicos.

Los indicadores relativos a las tasas de rehabilitación anuales son potencialmente desarrollables empleando los modelos, sin embargo, actualmente no es posible ya que requiere del paso del tiempo de un año para que el modelo pueda generarse de nuevo y comparar los avances entre ambos modelos.

Este indicador es muy relevante para conocer cómo está avanzando la rehabilitación en España. Su potencial se vería incrementado si se desglosase por zonas climáticas, tipos de edificios, tipo de municipios para conocer dónde está resultando más efectiva la rehabilitación. Además, su desglose por localización o municipio concreto permitiría evaluar si una estrategia a escala municipal ha resultado más efectiva que otras o identificar las tipologías y zonas necesitadas de una rehabilitación energética que no están siendo rehabilitadas actualmente y que podrían necesitar de políticas o medidas específicas para superar sus barreras a la rehabilitación. Las limitaciones de este indicador son principalmente dos: el requisito temporal para poder comparar dos modelos para ver la evolución, y la escasa definición que tienen las variables del catastro alfanumérico relativas a los indicadores de reforma o rehabilitación. Estas variables únicamente indican el año y el tipo de reforma clasificada por cuantía total, pero sin determinar si es una intervención energética, de accesibilidad o de reforma de una cocina entre otras posibles, lo que daña gravemente la calidad de una variable que precisando la intervención resultaría de gran relevancia.

6.1.15. Consumo anual de energía primaria y final: por tipo de edificio

Se puede aportar el indicador de CEPNR debido a que es el valor que se proporciona en el CEE. No es exactamente el indicador requerido, ya que debería incorporar la suma del consumo de energía primaria renovable y debería aportar el consumo de energía final, sin embargo, ya que el objetivo último es descarbonizar el parque edificado se considera que es de especial interés el CEPNR, ya que es la parte del consumo sobre la que se quiere incidir en las intervenciones de rehabilitación.

Adicionalmente, los valores de consumo de energía primaria total y el consumo de energía final son valores que están recogidos en variables internas

del archivo XML que se entrega al registrar un CEE, variables ‘Consumo de energía primaria total’ y ‘Energía final – Global’ indicadas en el documento [120], con lo que si se decidiese aportar estos valores todos ellos podrían ser incorporados a los modelos para dar estos datos.

En la tabla 33 se indica el CEPNR por tipo de edificio de la clasificación de la ERESEE, al emplear el modelo del capítulo 5 solamente se aportan datos de los edificios residenciales, al no estar incluidos los no residenciales, aunque podrían ser a futuro incorporados al modelo cuando haya suficientes CEE de usos no residenciales para entrenar el algoritmo.

Tabla 33. Consumo de energía primaria no renovable por tipo de edificio. Elaboración propia.

Tipo de edificio	Consumo de energía primaria no renovable ktep/año
Uu <1940	6.540,55
Uu 41-60	2.813,36
Uu 61-80	4.564,59
Uu 81-07	7.131,44
Uu 08-11	545,31
Uu 12-24	328,28
Cc <1940	514,14
Cc 41-60	415,90
Cc 61-80	1.022,40
Cc 81-07	3.361,88
Cc 08-11	439,44
Cc 12-24	109,78
Bb <1940	742,63
Bb 41-60	1.182,90
Bb 61-80	8.037,37
Bb 81-07	8.256,97
Bb 08-11	934,04
Bb 12-24	330,15
Total	47.271,14

Este indicador es muy relevante para conocer el consumo total de cada tipo de edificio, lo que es un dato clave para los objetivos generales de reducción del consumo de energía. Tiene un potencial muy significativo, sin embargo, desglosar además del tipo de edificio por la zona climática daría una visión mucho más completa del indicador, ya que es un aspecto fundamental. Además, aportar estos datos junto a los de número de edificios y superficie edificada daría una idea de la eficiencia general de estos edificios. Las principales limitaciones son el uso de CEPNR, debido a que no se publican en abierto los datos de consumo de energía primaria y final, y que no incorpora datos sobre el sector no residencial por la falta de CEE para entrenar adecuadamente el modelo en este sector.

6.1.16. Consumo anual de energía primaria y final: por uso final

Este indicador es potencialmente desarrollable con los UBEM generados, sin embargo, no se pueden aportar estos datos actualmente ya que el desglose del consumo de energía por uso final no se publica en la mayor parte de bases de datos de CEE en abierto. Estos datos, si están recogidos en los CEE y si se publicase, sería factible generar estos modelos desglosando su consumo por uso final. Conforme se avance hacia una publicación de los datos en abierto más completa estos datos serán fácilmente incorporables a los modelos y metodologías desarrolladas en esta tesis.

6.1.17. Ahorro de energía: edificios residenciales, no residenciales, edificios públicos

Estos indicadores son potencialmente calculables, pero al igual que en el caso de las tasas de rehabilitación conseguidas, se requiere del paso del tiempo para poder comparar el estado de la edificación entre dos modelos.

6.1.18. Uso medio de energía primaria en kWh/(m²a) para edificios residenciales

El indicador se puede obtener completo a través del modelo del capítulo 5, aunque como se ha comentado en otros casos, el valor obtenido es CEPNR.

El uso medio de CEPNR para edificios residenciales es 239,36 kWh/m²año, aunque como se detalla en [162] es fundamental desglosar este dato por zona climática al depender tan significativamente estos valores de la zona climática en la que se encuentra el edificio, haciendo que este valor no sea representativo del parque edificado nacional.

Este indicador tiene un potencial muy alto, ya que es clave para poder incidir en los edificios menos eficientes, considerando la zona climática para poder obtener información comparable. El potencial aumenta más si se desglosa por tipo de edificio también, como se desarrolla en el apartado 6.2 y en las tablas E.1 y E.2 del anexo E, al desglosar el indicador por zona climática y tipo de edificio podemos conocer los tipos de edificio menos eficientes bajo unas mismas necesidades de climatización, lo que permite identificar los segmentos menos eficientes del parque edificado. Asimismo, incorporar la emisión media de GEI aportaría también más información en un mismo indicador.

El indicador no presenta limitaciones más allá de la complejidad propia de generar los modelos, siendo uno de los que se pueden aportar de forma más completa gracias al modelo del capítulo 5.

El desglose del CEPNR por zona climática de la tabla 34 muestra la gran variación en las necesidades de climatización de cada zona, y cómo la letra que indica la zona climática de invierno es el factor que más determina el CEPNR. Se puede apreciar como el consumo medio en las zonas más frías, principalmente el interior de la península, es más del doble respecto de las zonas cálidas del sur peninsular y las Islas Canarias.

Tabla 34. Consumo de energía primaria no renovable medio por zona climática en edificios residenciales. Elaboración propia.

Zona climática	CEPNR medio kWh/m ² a
Alpha3	124,8
A2	147,3
A3	146,0
A4	152,0
B3	190,4
B4	186,8
C1	238,9
C2	224,8
C3	212,2
C4	223,6
D1	281,7
D2	273,0
D3	264,9
E1	312,7

6.1.19. Reducción de los costes energéticos por hogar

Actualmente el UBEM no incorpora aspectos relativos al coste de la energía. En el futuro, cuando se puedan comparar dos modelos, se podría estudiar el ahorro energético medio conseguido y la reducción de costes energéticos medios asociados a dicho ahorro.

6.1.20. Consumo de energía primaria del 15% y del 30% de los edificios más eficientes

El nombre completo del indicador es ‘Consumo de energía primaria de un edificio que forme parte del 15% de los edificios más eficientes desde el punto de vista energético (umbral de contribución sustancial) y de un edificio que forme parte del 30% de los edificios más eficientes desde el punto de vista energético (umbral de «no causar un perjuicio significativo») del parque inmobiliario nacional, con arreglo al Reglamento Delegado (UE) 2021/2139’.

Con el modelo nUBEM del capítulo 5 podemos analizar estos umbrales para determinar cuáles son los edificios. A nivel nacional, el valor límite para considerar que un edificio está en el 15% de los más eficientes es de 166,8 kWh/m²a, y que forma parte del 30% más eficiente es de 201,0 kWh/m²a.

Tabla 35. Consumo de energía primaria no renovable de un edificio que forme parte del 15% y 30% de los edificios más eficientes desde el punto de vista energético. Elaboración propia.

Zona climática	Valor límite 15%	Valor límite 30%
Alpha3	98,0	109,0
A2	117,8	130,1
A3	117,1	128,6
A4	126,4	137,5
B3	153,8	169,9
B4	147,1	163,3
C1	191,5	217,1
C2	183,7	200,5
C3	170,5	191,7
C4	183,7	202,9
D1	231,6	258,7
D2	221,4	247,4
D3	209,6	239,0
E1	263,3	293,8
España	166,8	201,0

Resulta interesante desglosar este indicador por zona climática, como en la tabla 35. Con base en estos datos, se aprecia que resulta fundamental separar estos valores por zona climática para determinar unos umbrales justos para los edificios, de forma que sean comparables en escenarios con necesidades de climatización iguales. En la tabla se aprecia cómo en las zonas cálidas los valores de CEPNR límite son la mitad que en las zonas frías.

El indicador no presenta limitaciones en su obtención, aunque como se comenta es necesario desglosarlo para poder obtener unos datos representativos del parque edificado.

6.1.21. Cuota de las instalaciones de calefacción en el sector de la construcción por tipo de caldera/instalación de calefacción

Actualmente los modelos no incorporan datos sobre las instalaciones en los edificios al no ofrecer esta información en la mayoría de las bases de los CEE en abierto. En el futuro si se aporta de forma más generalizada sería posible incorporar esta información en los modelos.

6.1.22. Emisiones de gases de efecto invernadero operativas anuales kg de CO_{2eq}/(m²a): por tipo de edificio

El indicador es completamente obtenible a través del modelo del capítulo 5, sobre el parque edificado residencial. El valor medio de las emisiones de GEI en todo el conjunto de edificios es de 52,04 kgCO_{2eq}/m²año y en la tabla 36 se muestra el desglose por tipo de edificio de la clasificación de la ERESEE.

En la tabla 36 se aprecia la importante reducción de las emisiones de GEI que se producen en todas las tipologías desde la entrada en vigor del CTE de 2006. Bajando hasta un 60% las emisiones entre los edificios anteriores al CTE y los relativos al periodo 2008-2024 y siendo las emisiones medias de los edificios más recientes un cuarto de las emisiones de los edificios más antiguos.

El indicador no presenta limitaciones más allá de la complejidad propia de crear los modelos, y posee un gran potencial si se desglosa por zona climática y tipo de edificio, como se propone en el apartado 6.2 y en las tablas E.1 y E.2 del anexo E, permitiendo identificar los tipos de edificio más contaminantes en unas mismas condiciones climáticas. Esto es clave para determinar los tipos de edificio que deben ser prioritariamente descarbonizados. Esta información junto con otra potencialmente calculable, como las tasas de rehabilitación, permitiría evaluar los segmentos más contaminantes del parque edificado a los que no están llegando las iniciativas de rehabilitación de forma adecuada, y poder dar datos para diseñar estrategias de rehabilitación para este parque edificado específico.

Tabla 36. Emisiones de gases de efecto invernadero operativas anuales kg de CO_{2eq}/(m²a) por tipo de edificio. Elaboración propia.

Tipo de edificio	Emisiones de GEI operativas anuales kgCO _{2eq} /(m ² a)
Uu <1940	58,0
Uu 41-60	58,6
Uu 61-80	57,2
Uu 81-07	49,2
Uu 08-13	36,8
Uu 14-17	25,5
Uu 18-19	18,1
Uu 20-24	15,4
Cc <1940	51,4
Cc 41-60	51,2
Cc 61-80	48,2
Cc 81-07	42,0
Cc 08-13	34,0
Cc 14-17	24,0
Cc 18-19	17,4
Cc 20-24	13,2
Bb <1940	46,7
Bb 41-60	49,3
Bb 61-80	45,0
Bb 81-07	39,3
Bb 08-13	31,3
Bb 14-17	22,2
Bb 18-19	16,3
Bb 20-24	12,4

6.1.23. Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero operativas anuales: por tipo de edificio

El indicador es potencialmente calculable, pero al igual que en el caso de las tasas de rehabilitación conseguidas, se requiere del paso del tiempo para poder comparar el estado de la edificación entre dos modelos. Este indicador posee un potencial muy alto ya que permitiría estudiar el avance en la descarbonización conseguido.

6.1.24. PCG a lo largo del ciclo de vida en edificios nuevos: por tipo de edificio

Actualmente los modelos no incorporan datos sobre ACV ni PCG. A futuro podrían ser implementados en los modelos si hay suficientes datos en abierto para ello. Este indicador es muy interesante a la par que complejo, ya que permitiría evaluar con un pensamiento de ciclo de vida el parque edificado, sin embargo, la limitación en la cantidad de datos que requeriría hace que no sea actualmente calculable.

6.1.25. Pobreza energética: Porcentaje de personas afectadas por la pobreza energética

Los modelos generados no incorporan datos sobre la pobreza energética al no contener información sobre las personas que los habitan. Los CEE se basan en unos perfiles de usuario preestablecidos y comunes para poder ser comparados y la mayor parte de la información sobre personas está protegida con lo que no es accesible en abierto. Si bien organismos nacionales podrían emplear el modelo para obtener información valiosa sin la necesidad de publicar en abierto esos datos. El potencial del indicador es muy grande, principalmente para garantizar una transición energética socialmente justa y equilibrada, que no deje atrás a las personas más vulnerables por falta de medios para rehabilitar sus viviendas.

El modelo a futuro podría integrar datos del INE que se publican a escala de sección censal y poder de forma anonimizada estudiar la correlación entre variables demográficas y el estado físico y energético del parque edificado en una sección censal. El modelo sí que incorpora información que puede ser de utilidad para el cálculo de este indicador acerca de la vulnerabilidad energética, la componente de la pobreza energética asociada a la mala eficiencia de las viviendas, esto les conlleva un mayor gasto energético lo que ahonda más en pobreza energética. Los datos relativos a la vulnerabilidad energética están desglosados en otros indicadores como el uso medio de energía primaria en edificios residenciales y se podría combinar con información como la variable del catastro alfanumérico de calidad de la edificación. Esta variable se encuentra disponible para todos los edificios y, como se detalla en el apartado 5.4.1., es una variable muy relacionada con el comportamiento energético de la edificación.

6.1.26. Factores de energía primaria

Este subapartado corresponde con los indicadores relativos a los factores de energía primaria, de los que se solicita: vector energético, factor de energía primaria no renovable, factor de energía primaria renovable, factor de energía primaria total.

No se pueden aportar estos datos con los modelos generados, ya que ni los factores de paso de energía primaria a final ni los vectores energéticos son temáticas que incluyan los UBEM. Estos datos no están publicados en los CEE, aunque sí están recogidos en las variables internas del archivo XML que se entrega al registrar un CEE, detallando el factor de paso de cada vector energético. Estas limitaciones impiden poder obtenerlo, aunque sería posible realizar el análisis si se aportasen. Este indicador es relevante debido a que el vector energético es uno de los puntos clave de la descarbonización y la transición hacia fuentes de energía limpias.

6.1.27. Definición de edificio de consumo de energía casi nulo para edificios nuevos y existentes

Este indicador no analiza el parque edificado como tal, sino que solicita una definición, lo que queda fuera del objetivo de esta investigación. En esta investigación se ha tomado como definición de EECN la que aporta el CTE DB-HE.

6.1.28. Nivel óptimo de rentabilidad de los requisitos mínimos de eficiencia energética para edificios nuevos y existentes

Actualmente el UBEM no incorpora aspectos relativos a la rentabilidad de las intervenciones, si bien podría ser un aspecto de potencial desarrollo del modelo.

b) Hoja de ruta para 2030, 2040 y 2050

Los indicadores de este dominio hacen referencia a los objetivos que se deben alcanzar para comprobar que se está avanzando de forma adecuada en la descarbonización del parque edificado.

Los modelos generados en esta investigación pueden proporcionar información valiosa para cuantificar las necesidades de rehabilitación de edificios, sirviendo así de apoyo en la toma de decisiones y en el establecimiento de objetivos basados en datos para desarrollar las hojas ruta de la rehabilitación. Si bien no es su finalidad determinar estos objetivos, ya que dicha tarea corresponde a los gobiernos, sí tienen como propósito ofrecer información útil que facilite su definición de manera fundamentada.

Dado que el análisis detallado de estos objetivos es esencial para garantizar la fiabilidad de las estimaciones, se considera que los modelos pueden contribuir significativamente a su desarrollo. No obstante, es necesario llevar a cabo un estudio pormenorizado para su adecuado cálculo. A modo de ejemplo, se presenta un desglose de la información obtenida para el primero de los

indicadores. En el resto de ellos se desarrolla únicamente el potencial de los modelos para generar información análoga.

6.1.29. Objetivos en relación con las tasas de renovación anuales: número y superficie total: por tipo de edificio

Los objetivos de la hoja de ruta se establecen en función de lo indicado en el artículo 9 de la EPBD titulado *Minimum energy performance standards for non-residential buildings and trajectories for progressive renovation of the residential building stock* de la EPBD de 2024 [63].

En este artículo de la directiva se establece que para uso no residencial se fijarán unos valores límite del 16% y 26% del consumo de energía primaria o final respecto a los valores de 2020. Para 2030 todos los edificios no residenciales deben consumir menos que el valor límite del 16% y para 2033 del valor límite del 26%. Quedan eximidos de esta norma los edificios protegidos, los de uso religioso, militar, edificaciones provisionales o menores a 50 m².

En cuanto al uso residencial los objetivos se establecen en cuanto al uso medio de energía primaria en valores de kWh/m²a. Y los datos deben desglosarse en número de edificios, viviendas o superficie rehabilitada, especificando el impacto de los resultados del 43% de los edificios con peor comportamiento energético.

Los objetivos en uso residencial deben establecerse con el foco en que el uso medio de energía primaria:

- Se reduzca en un 16% respecto a los valores del 1 de enero de 2020 para 2030 como máximo.
- Se reduzca en un 20-22% respecto a los valores del 1 de enero de 2020 para 2035.
- Para 2040 y cada 5 años se reduzca de forma proporcional hasta llegar a un parque edificado descarbonizado.

Además, se establece que, como mínimo, el 55% de la reducción de consumo de energía primaria debe corresponder al 43% de los edificios menos eficientes. Y se establece que la vivienda de uso secundario o vacía (con una ocupación menor a 4 meses) al año puede eximirse, así como edificaciones provisionales o menores a 50 m².

El mismo artículo de la directiva establece que las trayectorias nacionales se basarán en datos sobre el parque edificado nacional, en muestreos estadísticos y en los CEE. Lo que subraya la utilidad de los modelos desarrollados en esta investigación para aportar datos que permitan establecer estos objetivos.

Estos indicadores pueden desarrollarse de forma parcial con los modelos propuestos, en primer lugar, porque son una fuente de análisis de la información y no están diseñados para establecer objetivos sino proporcionar datos para poder apoyar la toma de decisiones. En segundo lugar, al solicitarse información sobre consumo de energía primaria y el modelo disponer solamente de CEPRN, se aportan datos que se consideran de relevancia, pero al no estar publicada en abierto la información sobre el consumo de energía primaria total ni final que forma parte de las variables internas de los CEE, no es posible generar esa información que se solicita. Y, en tercer lugar, para poder definir adecuadamente los objetivos de rehabilitación es necesario contar con el régimen de ocupación de las viviendas, cuya propiedad al ser un dato protegido no se encuentra accesible para ser incorporada al modelo. A efectos de ejemplo del potencial de los modelos se muestran datos sobre este indicador que podría apoyar el establecimiento de estos objetivos por parte de los equipos de gobierno dedicados a ello, si bien si se complementase el modelo con más parámetros podría darse una información mucho más elaborada.

En el caso del uso no residencial, se han establecido valores límite del 16% y del 26% de CEPNR, utilizando exclusivamente los datos publicados de CEE con fecha de registro anterior al 1 de enero de 2020. Para identificar qué edificios presentan una menor eficiencia en relación con las mismas exigencias de climatización, éstos se han desglosado por zona climática. La tabla 37 presenta el desglose detallado por zona climática y uso. Además, se ha considerado que los edificios de uso religioso están exentos de esta regulación.

Para obtener la información se ha empleado el modelo basado en CEE del capítulo 4 que contiene los edificios no residenciales certificados para poder establecer los umbrales límites en función de estos datos y se ha usado el modelo con todos los edificios de España estableciendo el número de edificios por uso y zona climática. Es importante destacar que en la tabla 37 se ha añadido una columna acerca del número de edificios certificados mostrando la cantidad de datos sobre los que se han realizado los porcentajes, al haber actualmente pocos edificios no residenciales certificados hay que estudiar caso por caso la representatividad de los valores límite obtenidos. En esa columna se aprecia que en múltiples usos no hay datos suficientes para considerar que el valor obtenido corresponde con la realidad de ese segmento del parque edificado con seguridad. Conforme avance la certificación energética del parque no residencial, se obtendrán valores más representativos o se podrá generar un modelo predictivo para el parque no residencial de manera análoga al nUBEM desarrollado en el capítulo 5.

Tabla 37. Valores límite del 16% y del 26% de CEPNR en kWh/m²a para uso no residencial. Número de edificios y de edificios certificados por zona climática y uso principal. Elaboración propia.

Zona climática	Uso del edificio	Número de edificios	Número de edificios certificados	V _{lim} 16%	V _{lim} 26%
Alpha3	Comercial	1.963	301	186,9	163,9
	Cultural	846	144	169,5	138,4
	Deportivo	2.378	442	174,1	149,7
	Espectáculos	133	24	155,9	154,6
	Ocio y Hostelería	1.283	242	178,2	154,8
	Oficinas	446	81	173,2	134,1
	Sanidad y Beneficencia	508	89	196,1	167,3
A2	Comercial	624	91	201,1	164,7
	Cultural	346	47	204,8	179,4
	Deportivo	967	136	197,8	182,8
	Ocio y Hostelería	429	51	188,2	172,9
	Oficinas	189	17	180,5	155,7
	Sanidad y Beneficencia	203	28	194,0	177,7
A3	Comercial	1.928	488	184,9	157,5
	Cultural	854	217	166,7	154,0
	Deportivo	2.259	572	185,2	153,3
	Espectáculos	142	32	155,5	145,0
	Ocio y Hostelería	1.246	302	203,4	186,5
	Oficinas	424	103	182,6	160,1
	Sanidad y Beneficencia	478	105	171,7	150,9
A4	Comercial	987	218	197,3	171,0
	Cultural	453	94	204,6	185,5
	Deportivo	1.393	298	174,6	162,0
	Espectáculos	77	18	187,3	162,3
	Ocio y Hostelería	739	156	183,0	166,6
	Oficinas	197	40	198,4	166,5
	Sanidad y Beneficencia	274	57	191,9	178,2
B3	Comercial	6.135	1.319	230,7	204,7
	Cultural	2.458	484	236,2	200,3
	Deportivo	7.102	1.434	242,1	212,0
	Espectáculos	414	83	247,0	202,3
	Ocio y Hostelería	4.043	862	238,2	207,1
	Oficinas	1.434	316	231,3	204,0
	Sanidad y Beneficencia	1.619	367	240,8	214,3
B4	Comercial	7.732	1.654	238,8	209,0
	Cultural	2.669	540	247,9	214,9
	Deportivo	8.229	1.676	241,6	213,0

6. Aplicabilidad de los modelos
6.1. Indicadores incluidos en la EPBD de 2024

	Espectáculos	687	172	256,9	226,6
	Ocio y Hostelería	4.066	814	233,8	209,0
	Oficinas	1.628	365	232,8	206,0
	Sanidad y Beneficencia	1.727	369	238,0	211,0
C1	Comercial	4.063	594	281,5	252,3
	Cultural	1.465	226	267,5	228,2
	Deportivo	4.687	649	287,6	252,5
	Espectáculos	362	47	303,5	259,0
	Ocio y Hostelería	2.328	351	308,5	267,2
	Oficinas	927	151	263,5	237,0
	Sanidad y Beneficencia	938	162	283,8	249,3
C2	Comercial	5.536	2.113	284,7	245,2
	Cultural	1.925	727	282,3	246,3
	Deportivo	5.181	1.899	286,5	248,4
	Espectáculos	294	91	270,3	242,4
	Ocio y Hostelería	3.214	1.174	281,2	243,6
	Oficinas	1.176	440	290,6	252,1
	Sanidad y Beneficencia	1.315	466	281,2	234,4
C3	Comercial	8.473	1.301	273,5	234,1
	Cultural	3.247	449	275,3	233,0
	Deportivo	9.855	1.401	266,0	228,0
	Espectáculos	590	73	260,9	230,0
	Ocio y Hostelería	5.201	766	268,6	241,0
	Oficinas	1.811	283	268,9	231,0
	Sanidad y Beneficencia	2.056	307	281,5	241,8
C4	Comercial	7.718	544	278,4	246,7
	Cultural	3.176	198	282,1	253,1
	Deportivo	9.658	832	290,6	255,3
	Espectáculos	476	37	336,8	278,2
	Ocio y Hostelería	4.851	346	316,0	259,2
	Oficinas	1.809	138	316,6	266,8
	Sanidad y Beneficencia	2.043	130	293,4	263,7
D1	Comercial	5.268	550	366,1	311,9
	Cultural	1.982	218	349,5	312,0
	Deportivo	5.983	708	369,9	316,4
	Espectáculos	322	34	331,8	282,0
	Ocio y Hostelería	2.995	318	357,6	314,8
	Oficinas	1.179	117	378,1	329,2
	Sanidad y Beneficencia	1.297	149	374,9	310,0
D2	Comercial	8.267	1.132	349,0	300,8
	Cultural	3.626	497	346,6	302,9
	Deportivo	10.148	1.332	355,0	308,8

	Espectáculos	772	101	350,9	303,3
	Ocio y Hostelería	5.485	696	351,2	308,1
	Oficinas	1.923	246	335,4	297,2
	Sanidad y Beneficencia	2.352	304	377,7	320,2
D3	Comercial	16.901	1.420	338,9	298,5
	Cultural	7.006	535	347,1	299,0
	Deportivo	19.310	1.414	341,6	291,4
	Espectáculos	1.318	101	354,7	291,5
	Ocio y Hostelería	10.491	880	342,0	291,7
	Oficinas	3.772	305	324,1	285,3
	Sanidad y Beneficencia	4.356	371	327,3	290,0
E1	Comercial	11.714	648	417,0	367,4
	Cultural	5.652	289	385,9	346,1
	Deportivo	14.158	792	398,9	348,4
	Espectáculos	939	42	380,1	339,0
	Ocio y Hostelería	8.006	450	407,3	358,4
	Oficinas	2.791	165	447,5	363,7
	Sanidad y Beneficencia	3.428	188	403,0	362,3
España	Uso no residencial	327.564	43.422	294,8	252,0

Los modelos pueden proporcionar información suficiente para establecer los valores límite del 16% y 26% de CEPNR a partir de los CEE y conocer la cantidad de edificios por uso y zona climática, siendo la información base para que se puedan establecer los objetivos de tasas de rehabilitación anuales.

Según se establece en la norma, el 16% y el 26% del parque edificado no residencial debe ser rehabilitado para 2030 y 2033 y así el parque edificado quede por encima de los valores límite de esos porcentajes. De forma general para España, con base en los datos del modelo a escala nacional, se tendrían que rehabilitar para 2030 un total de 52.410 edificios no residenciales, que corresponden a 26.850.437 m², un 16% del parque edificado no residencial. Y para 2033 serían 85.167 edificios no residenciales, que corresponden a 43.631.960 m², el 26%. Si bien un estudio centrado específicamente en este indicador puede integrar otras variables, a partir de esta información, para poder alcanzar los objetivos sería necesario rehabilitar anualmente 10.482 edificios para llegar el objetivo de 2025 y 17.033 edificios para poder alcanzar el objetivo de 2033, con el fin de lograr que el 26 % del parque edificado supere el valor límite.

En cuanto al uso residencial se puede emplear el modelo del capítulo 5 para conocer en mayor profundidad el estado energético del parque edificado en su conjunto.

Establecer unas tasas de rehabilitación de edificios que permitan alcanzar una reducción del 16% del consumo medio en kWh/m²a es un objetivo complejo

que depende de múltiples variables, como es la profundidad media de las rehabilitaciones realizadas, y el número de viviendas que se excluyen de esta directiva (viviendas ocupadas menos de 4 meses al año), así como otros factores externos, como las capacidades del sector de la construcción para poder llevarla a cabo y los fondos disponibles para poder apoyar estas intervenciones. Sin embargo, desde el modelo se pueden desarrollar distintos datos que apoyen las decisiones. Para paliar la falta de información se han tomado una serie de suposiciones:

- Se considera que la proporción de viviendas principales en España es del 74,6%, según se emplea este valor en la actualización de 2020 de la ERESEE [5], dato proveniente de la Encuesta Continua de Hogares.
- Los edificios se van a rehabilitar del menos al más eficiente en orden, esto si bien sería ideal no es el caso más probable, pero da el número mínimo de edificios que rehabilitar para poder alcanzar el objetivo indicado.
- Se establece que cada edificio que se rehabilita alcanza el valor que el CTE indica para su zona climática en obra nueva, por tanto, se plantean todas las rehabilitaciones como EECN rehabilitados. Con estas limitaciones se ha realizado un análisis para poder aportar datos para este indicador.

El consumo medio actual del parque residencial es de 239,36 kWh/m²a. Si se alcanza el objetivo de reducir el consumo del parque edificado residencial en un 16% el consumo medio sería de 201,04 kWh/m²a. Considerando una muestra aleatoria del 74,6% de viviendas principales, para poder alcanzar el consumo medio deseado habría que rehabilitar los 800.000 edificios con mayor consumo energético a EECN, estos edificios estarían ubicados prácticamente en exclusiva en las zonas climáticas más frías.

En el futuro podrían establecerse líneas de investigación que simulasen en los modelos diferentes tipos de rehabilitaciones para el parque edificado y comparar las diferencias en la consecución de los objetivos, así como aplicar tasas de rehabilitación similares o diferentes por zonas climáticas y estudiar su impacto en el consumo y las emisiones.

En la tabla 38 se muestra la disminución del consumo medio de energía primaria no renovable si se rehabilitasen los edificios con mayor consumo a EECN de su zona climática empleando los criterios marcados en el CTE DB-HE [180].

Tabla 38. Consumo medio de energía primaria no renovable según se rehabilite el parque residencial menos eficiente. Elaboración propia.

Número de edificios rehabilitados	CEPNR medio del parque residencial kWh/m²a
0	239,4
100.000	233,9
200.000	228,9
300.000	224,0
400.000	219,2
500.000	214,5
600.000	209,9
700.000	205,5
800.000	201,0
900.000	196,7
1.000.000	192,4
1.100.000	188,1
1.200.000	184,0
1.300.000	179,9
1.400.000	175,9
1.500.000	171,9
1.600.000	168,0
1.700.000	164,1
1.800.000	160,3
1.900.000	156,5
2.000.000	152,8

De acuerdo con estas estimaciones, habría que rehabilitar los 800.000 edificios con mayor consumo energético para obtener la reducción del consumo de energía marcada para 2030, y para 2035, un 20-22% de reducción habría que rehabilitar entre 1.100.000 y 1.200.000 edificios.

Las limitaciones para obtener este indicador son diversas. En primer lugar, determinar trayectorias y objetivos va más allá del alcance de esta investigación. Además, se suman las restricciones previamente mencionadas en el indicador. No obstante, su potencial es muy relevante, ya que establecer objetivos adecuados es fundamental para dimensionar correctamente los medios necesarios para alcanzarlos. En este contexto, el propósito de estos modelos es proporcionar información valiosa que respalde un cálculo preciso de dichos objetivos basado en datos.

6.1.30. Objetivos en relación con las tasas de renovación anuales: número y superficie total: edificios menos eficientes

En el indicador anterior se ha especificado la progresión en la tabla 38 del CEPNR medio según se interviene en los segmentos menos eficientes del parque edificado. Las limitaciones son las del indicador anterior y la importancia de este indicador es relevante para establecer objetivos e incidir en el parque edificado menos eficiente.

Sobre los objetivos y las tasas de rehabilitación se obtendrían datos de manera análoga al indicador anterior especificando el segmento del parque residencial sobre el que se desea incidir.

6.1.31. Objetivos en relación con las tasas de renovación anuales: número y superficie total: el 43% de los edificios residenciales menos eficientes

Según las estimaciones del indicador anterior, si se rehabilitara el 43 % de los edificios residenciales menos eficientes y considerando la distribución de viviendas principales previamente descrita, esto implicaría la rehabilitación de 2.784.080 edificios, que comprenden 4.347.134 viviendas rehabilitadas y un total de 462.004.859 m² residenciales. Como resultado, el consumo medio del parque nacional se situaría en 125,2 kWh/m²a.

Las limitaciones son las ya mencionadas, y la relevancia de este indicador radica en su papel para establecer los objetivos conforme a los requisitos de la EPBD de 2024. En cuanto a los objetivos y las tasas de rehabilitación, los datos se obtendrían de manera análoga al indicador anterior, especificando el segmento del parque residencial sobre el que se desea actuar.

6.1.32. Otros indicadores

A continuación, se lista el resto de los indicadores que son potencialmente calculables a través de los modelos o que se puede obtener información valiosa para una toma de decisiones basada en datos. Sin embargo, por falta de información o por requerir de un estudio específico para poder obtenerlos no son directamente obtenibles con la información actual de los modelos. Las principales causas por las que no se pueden obtener actualmente estos indicadores son cuatro:

- Falta de datos en abierto para poder obtener la información. Este es el caso de muchos indicadores que solicitan consumo de energía primaria y consumo de energía final, valores que aun siendo variables internas

del CEE y estando recogidas en el XML que se entrega, no están publicadas en abierto.

- Necesidad de evaluar cambios en el parque edificado que requieren de dos modelos, uno anterior y otro posterior para poder ser medidos. Este es el caso, entre otros, de las tasas de rehabilitación anuales.
- Necesidad de estudiar el indicador en específico y teniendo en cuenta otros factores externos al parque edificado, como es la capacidad del sector de la construcción, la pobreza energética o la disponibilidad de fondos para la rehabilitación. Este es el caso de los indicadores relativos a la hoja de ruta y sus objetivos.
- Necesidad de seleccionar la política o medida a evaluar. Es el caso del dominio 'c) Visión general de las políticas y medidas puestas en ejecución y previstas', donde se requiere escoger la medida sobre la que se desea conocer su impacto.

Los indicadores de progreso de la hoja de ruta son desarrollables de manera análoga a los anteriores a través de los modelos, si bien resulta necesario un estudio detallado y específico para poder establecer los objetivos de forma adecuada.

En la categoría de políticas y medidas puestas en ejecución y previstas, encontramos una serie de indicadores de progreso potencialmente calculables a través de los modelos desarrollados en esta investigación. Sin embargo, estos requieren de un estudio específico para cada caso particular, de la elección de las políticas y medidas que se quiere medir su efecto y generalmente de dos modelos, anterior y posterior para poder evaluar su impacto de forma precisa.

A continuación, se detalla un listado de los indicadores de progreso potencialmente obtenibles:

Dominio: b) Hoja de ruta para 2030, 2040 y 2050

- Objetivos en relación con el consumo anual previsto de energía primaria y final (ktep): por tipo de edificio
- Objetivos en relación con el consumo anual previsto de energía primaria y final (ktep): por uso final
- Ahorro de energía previsto: por tipo de edificio
- Objetivos en relación con las emisiones de gases de efecto invernadero operativas previstas (kg de CO_{2eq}/(m²a): por tipo de edificio
- Objetivos en relación con la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero operativas previstas (%): por tipo de edificio
- Objetivos en relación con la cuota prevista (%) de edificios renovados: por tipo de edificio
- Objetivos en relación con la cuota prevista (%) de edificios renovados: por profundidad de renovación

- Objetivos en relación con las emisiones de gases de efecto invernadero del ciclo de vida completo previstas (kg de CO_{2eq}/(m²a) en edificios nuevos: por tipo de edificio

Dominio c) Visión general de las políticas y medidas puestas en ejecución y previstas

- Las normas mínimas de eficiencia energética nacionales de conformidad con el artículo 9, y otras políticas y acciones dirigidas a los segmentos menos eficientes del parque inmobiliario nacional, incluidas las garantías a que se refiere el artículo 17, apartado 19;
- El fomento de enfoques por distritos y barrios y de programas integrados de renovación por distritos, que pueden abordar asuntos como la energía, la movilidad, las infraestructuras verdes, el tratamiento de los residuos y del agua y otros aspectos urbanísticos y pueden tener en cuenta los recursos locales y regionales, la circularidad y la suficiencia;
- Políticas y medidas en relación con los siguientes aspectos: el aumento de la resiliencia de los edificios frente al cambio climático

e) Umbrales de edificios nuevos y renovados de cero emisiones, a que se refiere el artículo 11

- Umbrales de emisiones de gases de efecto invernadero operativas de los edificios nuevos de cero emisiones
- Umbrales de emisiones de gases de efecto invernadero operativas de los edificios renovados de cero emisiones
- Umbrales anuales de uso de energía primaria de los edificios nuevos de cero emisiones
- Umbrales anuales de uso de energía primaria de los edificios renovados de cero emisiones

f) Normas mínimas de eficiencia energética para edificios no residenciales

- Umbrales máximos de eficiencia energética, con arreglo al artículo 9, apartado 1

g) Normas mínimas de eficiencia energética para edificios residenciales

- La trayectoria nacional para la renovación progresiva del parque inmobiliario residencial, incluidos los hitos de 2030 y 2035 para el uso medio de energía primaria en kWh/(m²a), con arreglo al artículo 9, apartado 2

6.2. Análisis del parque edificado a gran escala

Las metodologías y modelos generados en esta tesis presentan un amplio abanico de aplicaciones y potencialidades en el análisis del parque edificado. Al

generar modelos edificio a edificio que manejan grandes volúmenes de datos, permiten ir más allá de los indicadores de progreso de la EPBD.

Al integrar información de diversas fuentes y analizarla conjuntamente, estos modelos posibilitan la identificación de patrones y relaciones que de otro modo pasarían desapercibidos. Esto permite evaluar cómo interacciones entre las características físicas, el contexto geográfico y el comportamiento energético se relacionan. Asimismo, estos análisis integrales de las características permiten establecer y respaldar políticas y medidas basadas en datos.

Empleando la información de los modelos se desglosa una sugerencia de indicadores – análisis que permiten conocer más en detalle las características del parque edificado.

6.2.1. Desglose de datos del parque edificado por zona climática y tipo de edificio. Cantidad y comportamiento energético.

Un punto común en muchos de los indicadores de progreso de la EPBD es que resultaban mucho más representativos si el indicador se expresaba incluyendo la zona climática y el tipo de edificio. En este apartado se desglosan los datos relativos a la cantidad de edificios de cada tipo y su comportamiento energético medio y mediano en dos grandes tablas la información.

En la tabla E.1 del anexo E se detalla por zona climática y tipo de edificio:

- Número de edificios
- Superficie edificada
- Número de viviendas
- Número de bienes inmuebles
- Número de edificios certificados

En la tabla E.2 del anexo E se detalla por zona climática y tipo de edificio:

- CEPNR medio en kWh/m²a
- CEPNR mediano kWh/m²a
- Emisiones GEI medias kgCO_{2eq}/m²a
- Emisiones GEI medianas kgCO_{2eq}/m²a

Este análisis se obtiene a través del modelo generado en el capítulo 4. Los datos proporcionados incluyen todas las zonas climáticas y todos los edificios del catastro español, clasificando los edificios en Uu – unifamiliar, Cc – Bloque plurifamiliar de 3 o menos plantas, Bb – Bloque plurifamiliar de 4 o más plantas y se añade en este caso Tt – Edificios de uso no residencial y combinado con el periodo de construcción al que se han añadido los posteriores al CTE clasificados según las diferentes actualizaciones de la norma en materia energética. Los datos

energéticos corresponden a los valores extraídos de los CEE de cada tipo de edificio, en la primera tabla se incorpora el número de edificios certificados como un dato útil para estudiar su representatividad respecto de cada tipología.

La información aportada, si bien no es un indicador per se, se considera que es una información relevante para poder conocer el estado de la edificación en todas las tipologías y zonas climáticas de España. También puede servir de fuente de información tanto para poder asumir valores razonables en posteriores estudios como para evaluar futuros modelos y conocer si representan adecuadamente las tipologías de edificios.

6.2.2. Comportamiento energético del parque edificado

Sobre la base de esta información se pueden desglosar los datos en tablas y gráficas más manejables. En la figura 35 se muestra una actualización de las gráficas publicadas en [100], desglosando el CEPNR por zona climática y por periodo de construcción. En esta gráfica se aprecia tanto la relevancia de las zonas climáticas, en especial la de invierno, con unos rangos de CEPNR mucho más amplios, y el fuerte descenso del CEPNR que se da en cada cambio de la normativa relativa a eficiencia energética.

Se muestra el fuerte cambio en el consumo de energía de los edificios nuevos en todas las zonas climáticas, consumiendo en las zonas climáticas más cálidas un 44% de la energía que necesitan los edificios menos eficientes, y llegando a consumir un 22% de la energía que requieren los edificios menos eficientes en las zonas frías por metro cuadrado.

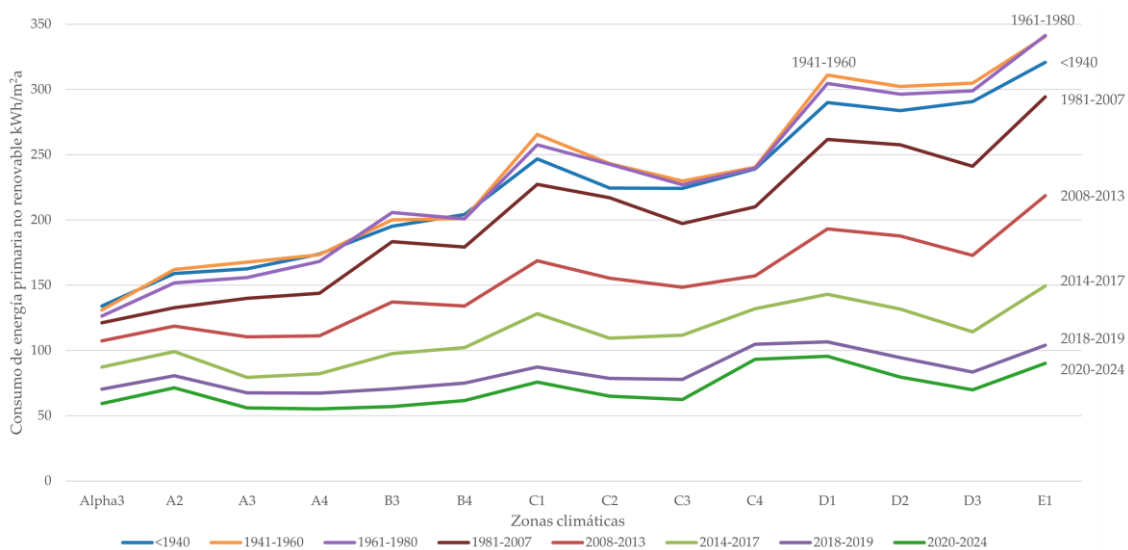


Figura 35. CEPNR por zona climática y periodo de construcción. Elaboración propia.

En la figura 36 se muestran las emisiones de GEI operativas medias por zona climática y periodo de construcción. Los resultados siguen las mismas tendencias que la figura anterior, mostrando una reducción de emisiones muy fuerte en los nuevos edificios, los cuáles emiten entre un 42% y un 22% de lo que emiten los periodos de construcción más contaminantes de cada zona climática, consiguiendo las mayores reducciones en los climas más fríos.

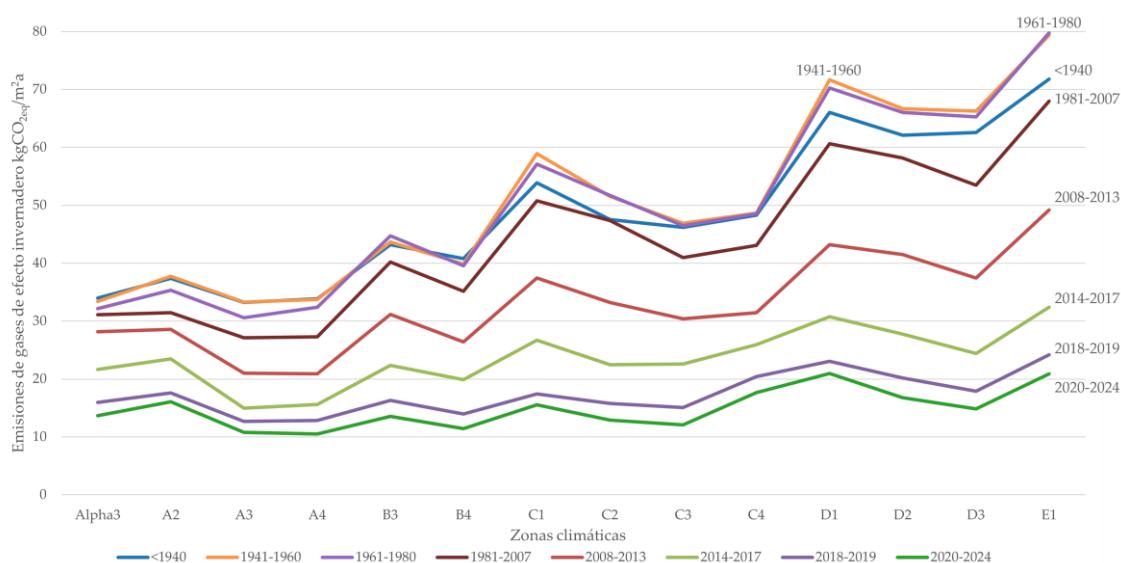


Figura 36. Emisiones de GEI por zona climática y periodo de construcción. Elaboración propia.

En las tablas 39, 40, 41, 42, 43 se expone una visión de los datos sobre el consumo y las emisiones. Para mostrar la información de forma concisa se agrupa la información por zona climática de invierno y por periodo de construcción.

En la tabla 39, se indica el número de edificios por zona climática y periodo de construcción, proporcionando una idea aproximada de la relevancia de cada clima en el parque edificado nacional. Como puede apreciarse, las categorías más numerosas son las de las zonas climáticas de invierno D y C y los periodos de construcción anterior a 1940 y entre 1981 y 2007, ambos anteriores al CTE. Estos edificios corresponden al interior y a la zona costera de la mitad norte de España aproximadamente.

Tabla 39. Número de edificios en España por zona climática de invierno y periodo de construcción. En azul las categorías más numerosas, en blanco las menos numerosas.
Elaboración propia.

Número de edificios						
	Alpha	A	B	C	D	E
<1940	43.621	79.540	358.588	838.164	1.135.126	627.747
1941-1960	33.700	61.462	226.453	383.232	431.423	157.447
1961-1980	78.749	173.110	477.001	691.438	716.090	183.514
1981-2007	112.098	279.680	700.541	996.481	1.246.988	286.239
2008-2011	7.689	19.079	62.264	102.290	132.756	37.325
2012-2024	3.963	13.858	40.824	73.653	97.046	28.570

En la tabla 40 se muestra la superficie edificada bajo los mismos criterios que la tabla anterior, dando una idea de la superficie total de cada combinación. Esta tabla junto a la tabla 42 ponen en relevancia la gran masa de superficie a rehabilitar en todas las zonas climáticas, y especialmente en los climas D y E, los más contaminantes.

Como se observa en las tablas 39 y 40, aproximadamente el 74,7% de los edificios en España se encuentra en las tres zonas de invierno más frías, las cuales representan el 67,7% de la superficie total construida que requiere un CEE (edificios residenciales, oficinas, comerciales, de hostelería, culturales, sanitarios y religiosos). Asimismo, el 94,3% de los edificios fue construido antes de 2007, año de implementación del CTE, abarcando el 90,4% de la superficie construida.

Tabla 40. Superficie edificada en España que requiere de climatización por zona climática de invierno y periodo de construcción. En azul las categorías más numerosas, en blanco las menos numerosas. Elaboración propia.

Superficie edificada (miles de m²) por zona climática						
	Alpha	A	B	C	D	E
<1940	7.966	16.552	73.700	154.995	175.943	61.832
1941-1960	7.277	12.480	49.017	79.698	95.970	21.825
1961-1980	31.894	73.444	215.847	289.743	291.411	41.642
1981-2007	65.412	150.971	345.069	409.864	476.738	87.201
2008-2011	5.814	16.796	43.973	57.773	73.553	12.496
2012-2024	3.227	10.512	27.151	35.801	51.537	6.718

El número de edificios certificados en España se muestra en la tabla 41, donde se observa que la masa de CEE se acumula en los periodos de 1961 a 2007 en

todas las zonas climáticas. Esto es coherente con la mayor cantidad de edificios construidos en esa época y refleja el avance que ha supuesto al progreso de la certificación energética el requerirlos para poder vender, alquilar o rehabilitar con ayudas públicas.

Tabla 41. Número de edificios certificados en España por zona climática de invierno y periodo de construcción. En azul las categorías más numerosas, en blanco las menos numerosas. Elaboración propia.

Número de edificios certificados						
	Alpha	A	B	C	D	E
<1940	2.487	4.988	32.277	69.944	34.055	9.205
1941-1960	3.046	5.876	24.900	41.378	22.565	6.212
1961-1980	9.711	27.497	91.154	133.121	57.345	11.960
1981-2007	17.202	45.940	120.219	141.500	79.361	22.012
2008-2011	1.644	3.985	11.625	16.599	10.786	3.830
2012-2024	681	2.512	8.647	12.630	7.510	2.215

La tabla 42 muestra el CEPNR medio de cada tipo de edificio y zona climática, apreciándose la fuerte variación entre zonas climáticas y periodos de construcción, lo que destaca la necesidad de intervenir en los sectores más antiguos de la edificación y especialmente en las zonas más frías de España, con unos ahorros energéticos muy grandes, y que corresponden principalmente al interior peninsular.

Además, como se desarrollará en el subapartado 6.2.3. Análisis del parque edificado rural y urbano, estas zonas climáticas incluyen la mayor parte de las zonas rurales y en el próximo apartado se van a estudiar sus características y las diferencias que se encuentran en su composición del parque edificado.

Tabla 42. CEPNR medio (kWh/m²a) en España por zona climática de invierno y periodo de construcción. En escala de verde a rojo aumento del CEPNR medio. Elaboración propia.

Consumo de energía primaria no renovable (kWh/m²a)						
	Alpha	A	B	C	D	E
<1940	119,4	152,4	187,4	218,0	277,3	325,4
1941-1960	127,0	156,2	188,6	232,2	295,8	345,0
1961-1980	128,4	144,1	188,6	225,3	283,6	326,0
1981-2007	131,0	136,6	183,5	206,3	245,9	278,9
2008-2011	116,0	119,3	142,3	159,3	189,3	228,8
2012-2024	77,8	70,5	78,9	91,1	113,1	143,2

La tabla 43 indica las emisiones de GEI emitidas en España por cada zona climática, correspondiendo con unas conclusiones análogas a la tabla anterior. Como se indica en el subapartado 6.2.3. Análisis del parque edificado rural y urbano, la ruralidad del parque edificado también tiene un impacto en el vector energético de los edificios y por tanto una repercusión en las emisiones que genera.

Tabla 43. Emisiones de GEI medias ($\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{m}^2\text{a}$) en España por zona climática de invierno y periodo de construcción. En escala de verde a rojo aumento de las emisiones. Elaboración propia.

Emisiones de gases de efecto invernadero ($\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{m}^2\text{a}$)						
	Alpha	A	B	C	D	E
<1940	30,0	31,2	41,4	46,4	61,0	74,1
1941-1960	32,1	31,4	39,7	49,2	64,8	81,1
1961-1980	32,5	28,4	39,9	48,0	62,8	75,0
1981-2007	33,3	26,5	38,5	43,9	54,4	63,5
2008-2011	29,9	23,2	30,2	33,3	40,8	50,4
2012-2024	19,8	13,3	16,3	18,2	23,6	30,4

Observando cómo se relacionan las diferentes variables existen diferentes puntos claves a analizar.

Los modelos UBEM generados permiten calcular diferentes indicadores de progreso y proporcionar un nivel de detalle que supera los requisitos establecidos por la EPBD de 2024. Este nivel de precisión resulta especialmente útil para analizar y focalizar los esfuerzos de rehabilitación de manera efectiva en los edificios que más lo necesiten.

Por ejemplo, como se desarrolla en [177], el indicador de uso medio de energía primaria en $\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$ para edificios residenciales. La figura 37 muestra cómo el modelo puede analizar a escala nacional el comportamiento energético del parque edificado, representando la distribución del CEPNR en cada zona climática de España.

Esta gráfica representa los valores de CEPNR en $\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$ por zonas climáticas, presentando la distribución del CEPNR entre los edificios más y menos eficientes de cada zona. Cada caja del diagrama representa el 50% central de los consumos energéticos (rango intercuartílico o IQR) dentro de una zona climática específica. Los bordes superior e inferior de la caja corresponden a los percentiles 75 y 25, respectivamente, que indican dónde se encuentra la mayoría de los edificios en términos de consumo energético. Los bigotes del diagrama muestran los edificios con el 5% mejor y el peor rendimiento, mientras que la línea blanca dentro de cada caja marca la mediana del consumo.

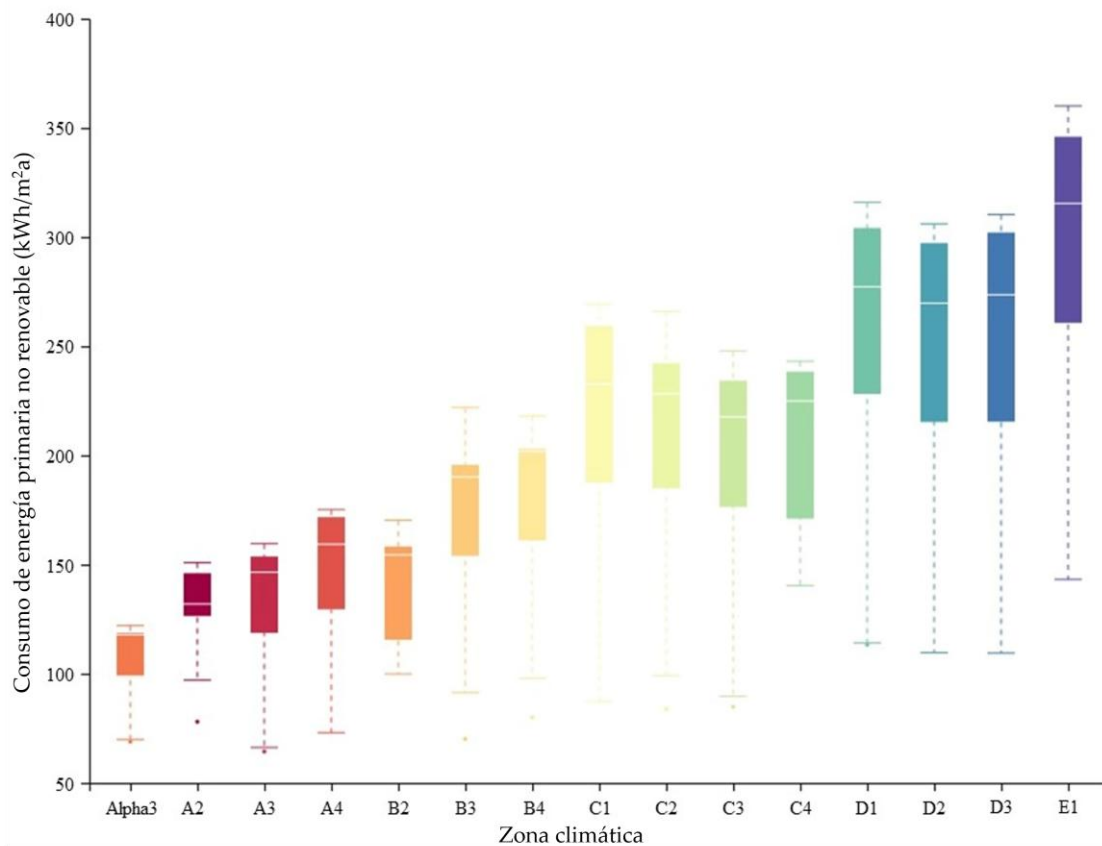


Figura 37. Diagrama de cajas de los rangos de CEPNR (kWh/m²a) por zona climática en España. Elaboración propia, publicada en [177].

Los resultados indican que la mayoría de los edificios se concentran en la parte superior de cada diagrama, lo que evidencia un parque edificado generalmente ineficiente, con altos niveles de consumo energético que podrían reducirse mediante rehabilitaciones. La diferencia significativa entre los valores inferiores y la mediana resalta el potencial de ahorro energético si se logra mejorar la eficiencia general del parque edificado hacia los niveles de los edificios más eficientes, representados por los "bigotes" inferiores. En algunas zonas climáticas aparecen puntos, son grupos de edificios que tienen un valor de más de 1,5 veces el IQR, son conjuntos de edificios mucho más eficientes que los valores estadísticos de la zona climática.

Las zonas climáticas están ordenadas de las más cálidas a las más frías, y el análisis revela que el CEPNR es considerablemente mayor en climas fríos en comparación con los cálidos. Esto subraya la necesidad y el potencial de implementar esfuerzos de rehabilitación energética en las zonas más frías, donde los ahorros podrían ser más significativos.

Esta gráfica se puede analizar junto con las gráficas 33 y 34, que ofrecen una información similar agrupada por periodo de construcción. Comparativamente ésta es una gráfica más compleja, que integra en el análisis en lugar de la fecha

de construcción, la distribución del consumo dato a dato. También permite evaluar, por ejemplo, la variabilidad de los consumos en los edificios, representada por los tamaños de las cajas y los bigotes, apreciándose que es posible contar con un gran potencial de mejora en todas las zonas climáticas.

Un punto importante al analizar el comportamiento energético del parque edificado es considerar también su ratio de CEPNR y emisiones de GEI, lo que está determinado principalmente por dos factores, el vector energético y la eficiencia de las maquinarias de climatización. Esta información está incluida en las variables del XML del CEE y está recogida en las bases de datos, sin embargo, no está disponible en abierto en casi ninguna CCAA. En el capítulo 4 en la tabla 8 se indican las siete CCAA que sí lo ofrecen, sin embargo, quedan 11 CCAA y ciudades autónomas que no lo aportan. Por lo tanto, no forma parte de la información disponible como para estudiarlo a escala nacional. Este punto sin embargo se puede paliar estudiando la relación entre el CEPNR y las emisiones de GEI por para tipo de edificio.

En la figura 38 se muestra la relación que hay entre el CEPNR y las emisiones de GEI por tipo de edificio y zona climática, los datos en la gráfica se indican una relación lineal, a más consumo más emisiones, que va desde las zonas cálidas, en rojos, a las más frías, azules, con mayores consumos y emisiones.

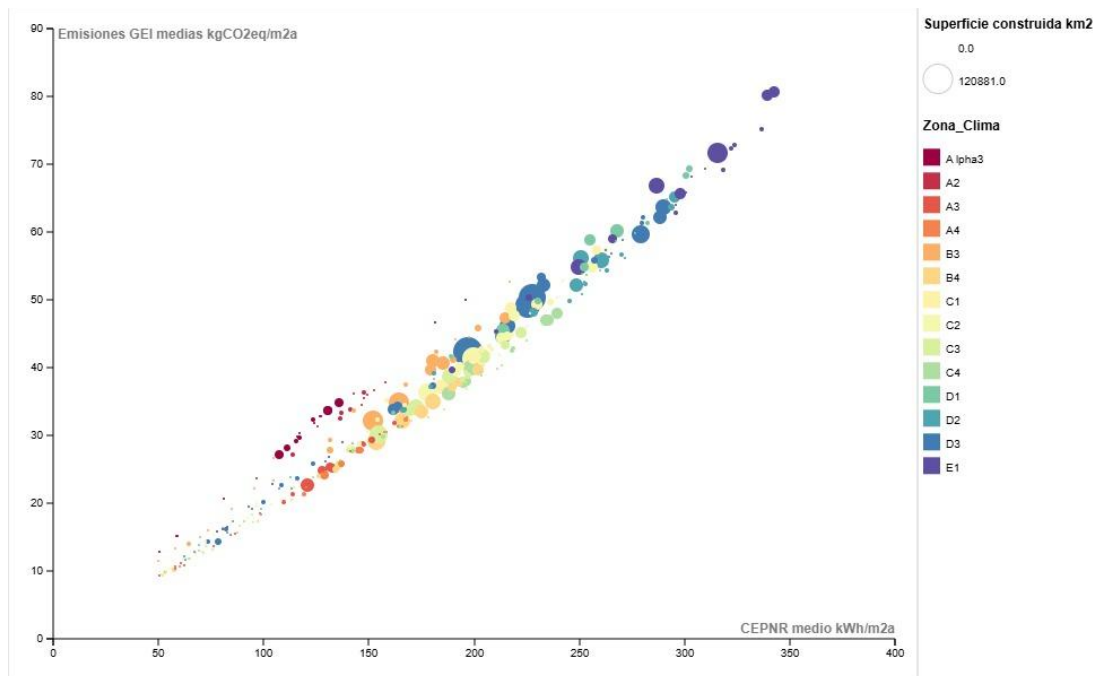


Figura 38. Gráfica de la relación entre el CEPNR medio y las emisiones de GEI medias por zona climática y tipo de edificio. El color indica la zona climática y el tamaño de cada círculo indica la superficie total construida en km². Elaboración propia.

En esta gráfica es interesante conocer los círculos que quedan por encima de la diagonal que forman los datos. Estos círculos son los que poseen una peor relación entre emisiones y CEPNR, emitiendo más respecto a edificios con un consumo similar. Por encima de la media encontramos los edificios de la zona climática Alpha 3, perteneciente a las Islas Canarias, la cual, si bien tiene consumos y emisiones relativamente bajas, emite comparativamente más que otros tipos de edificios con consumos similares como los edificios de las zonas A y B, por lo que mejorar la eficiencia de sus instalaciones debería ser una prioridad, al ser menos eficientes o emplear vectores energéticos más contaminantes.

El tamaño de cada circunferencia representa la superficie construida del tipo de edificio en km^2 , representando la cantidad de superficie con esos consumos y emisiones medias, destaca la presencia de las circunferencias más grandes en la mitad superior de la gráfica, y la ausencia de estas en la zona de la esquina inferior izquierda. Esquina donde se encuentran los edificios con menor consumo y emisiones, los pertenecientes a las normativas más recientes, que forman una pequeña cantidad frente a la gran cantidad de superficie energéticamente ineficiente del parque edificado nacional.

Los edificios más contaminantes, en la esquina contraria, pertenecen a la zona climática E1, siendo los relativos a los edificios construidos desde antes de 1940 hasta 1980 en todas sus categorías.

Esta gráfica es importante para el análisis y la planificación de políticas y medidas para intervenir específicamente en la mejora de las instalaciones de climatización. Por ejemplo, fomentando el cambio a maquinaria más eficiente y reemplazando el vector energético actual por uno limpio. Es importante enfatizar los esfuerzos en los tipos de edificios de la cara superior de la diagonal, los que a un mismo CEPNR generan mayores emisiones.

Además de conocer el comportamiento energético por zonas climáticas, es útil conocer el CEPNR por Comunidad Autónoma. Ya que las ayudas a la rehabilitación en general, aunque parten de la Unión Europea y del Estado, se distribuyen a través de las CCAA, realizando éstas un papel fundamental en la distribución y asignación de las ayudas.

La figura 39 muestra el CEPNR en $\text{kWh/m}^2\text{a}$ por tipo de edificio. Comprender el comportamiento energético del parque edificado por CCAA permite orientar mejor la distribución de los fondos, asegurando que cada comunidad reciba el apoyo acorde a sus necesidades. Además, disponer de estos datos facilita a las propias comunidades una gestión más eficiente de las ayudas a la rehabilitación.

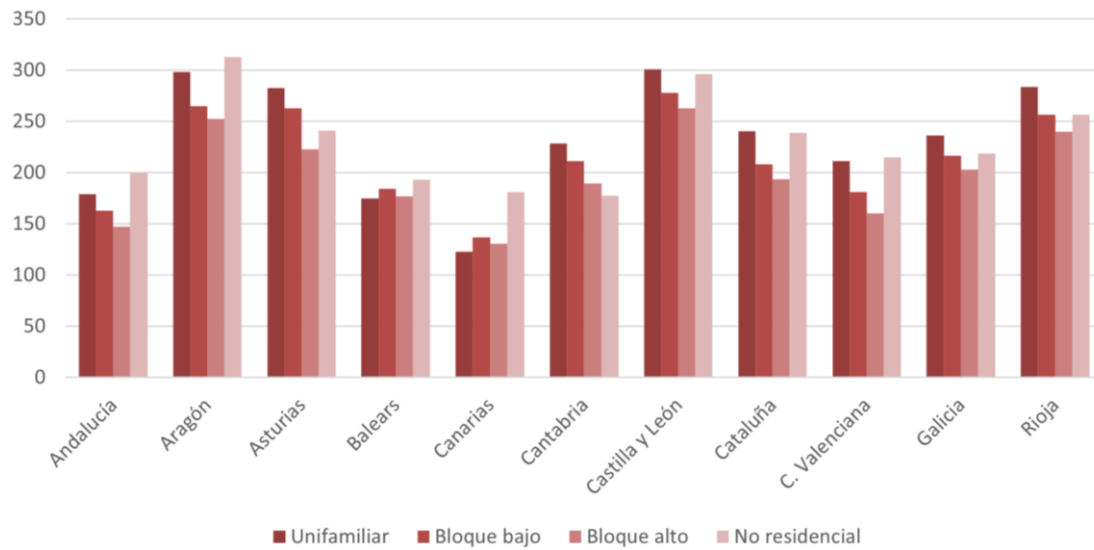


Figura 39. Consumo de energía primaria no renovable por tipo de edificio y Comunidad Autónoma. Bloque bajo: edificio plurifamiliar de 3 o menos alturas; Bloque alto: edificio plurifamiliar de 4 o más alturas. Elaboración propia.

6.2.3. Análisis del parque edificado rural y urbano

En este apartado se presenta un resumen de la investigación del capítulo de libro *Clasificación y caracterización del parque habitacional en zonas rurales* [202]. En él se estudian las diferencias entre el parque residencial urbano y el rural, así como su diferente comportamiento energético y las necesidades de rehabilitación que esto conlleva. Este aspecto no está incluido en ninguno de los indicadores de progreso de ninguna propuesta de la EPBD, aunque se destaca la importancia de diseñar políticas específicas para el ámbito rural.

Durante la investigación realizada en esta tesis, las diferencias entre el parque edificado urbano y rural, tanto físicas como energéticas, se manifiestan como un factor muy relevante que debe considerarse al analizar el parque edificado. En el capítulo 4 se ha detallado ya la clasificación de municipios urbanos y rurales y su desglose en pequeño y gran rural y urbano por población. Para realizar este análisis se ha empleado el modelo basado en CEE y datos en abierto, combinando la información del modelo con la aportada en el Atlas de la Edificación Residencial en España [206]. Este atlas aporta gran cantidad de información sobre el parque edificado, dando los datos desglosados a escala de sección censal. Éstos son principalmente de 2011, fecha de la última publicación de la mayor parte de los datos a falta de una información más actualizada en este momento.

6.2.3.1. Tipologías de vivienda: vivienda unifamiliar / plurifamiliar; viviendas principales, secundarias y vacías; viviendas por alturas del edificio

El estudio de la distribución del parque de viviendas en España pone de manifiesto una marcada diferencia entre las áreas rurales y urbanas en cuanto a la tipología edificatoria predominante. En el ámbito rural, las viviendas unifamiliares constituyen la mayor parte del stock residencial, con un 66,6% del total de 7.818.850 unidades existentes en el país, mientras que en las zonas urbanas este porcentaje se reduce al 33,4%. En contraposición, el modelo de vivienda plurifamiliar es el dominante en las ciudades, donde se concentra el 77,2% de las 16.860.725 unidades de esta tipología, frente al 22,8% que se encuentra en municipios rurales.

La relación entre el tamaño del municipio y la tipología edificatoria se muestra en la figura 40 y es clara. En las localidades con menor densidad demográfica, el porcentaje de viviendas unifamiliares aumenta progresivamente, alcanzando el 92,2% en municipios con 100 habitantes o menos. En cambio, en grandes núcleos urbanos, las viviendas plurifamiliares son mayoritarias, representando hasta el 90,5% en aquellos con más de 100.000 habitantes.

Si se considera el conjunto del medio rural, las viviendas unifamiliares suponen el 57,5% del total, con una mayor incidencia en municipios de menor tamaño. En los denominados "rural pequeño" (hasta 5.000 habitantes), esta tipología alcanza el 72,8%, mientras que en los municipios clasificados como "gran rural" desciende al 44,6%. Por el contrario, en el ámbito urbano las viviendas unifamiliares representan solo el 16,7%, aunque con diferencias internas: en los municipios "pequeño urbano" la proporción es del 25,9%, mientras que en los de mayor tamaño ("gran urbano") apenas llega al 9,5%.

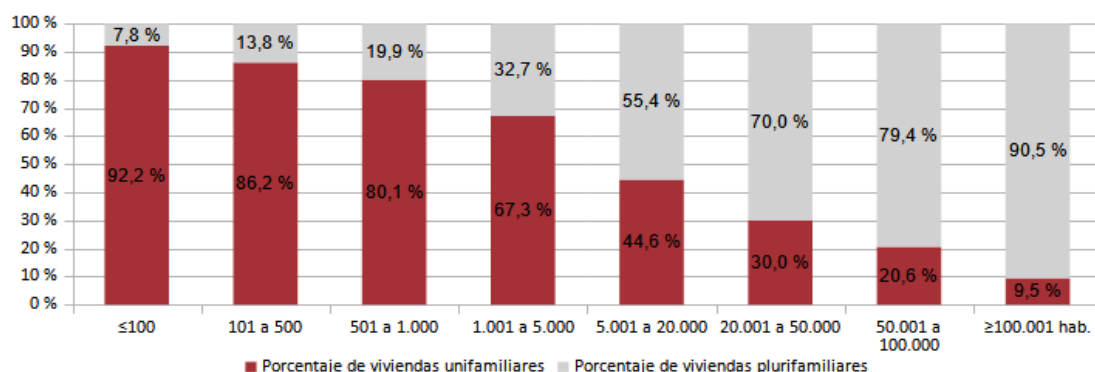


Figura 40. Porcentaje de viviendas unifamiliares y plurifamiliares por tamaño de municipio. Elaboración propia a partir de los datos del Atlas de la Edificación Residencial en España [206] y el modelo basado en CEE y datos en abierto, publicada en [202].

Desde la perspectiva del uso de la vivienda, es relevante diferenciar entre viviendas principales, secundarias y vacías, dado su impacto en la planificación de políticas de rehabilitación energética. Las estrategias de descarbonización se enfocan exclusivamente en la mejora de la eficiencia en las viviendas principales, ya que estas concentran los mayores niveles de consumo energético y, por tanto, ofrecen un mayor margen de reducción mediante intervenciones específicas [5].

En términos absolutos, el parque residencial en España está compuesto por 18.025.630 viviendas principales, lo que representa el 72,9% del total, seguido de 3.546.010 viviendas secundarias (14,3%) y 3.165.665 viviendas vacías (12,8%) (tabla 44).

Tabla 44. Número de viviendas principales, secundarias y vacías por tamaño de municipio. Elaboración propia a partir de los datos del Atlas de la Edificación Residencial en España [206] y el modelo basado en CEE y datos en abierto, publicada en [202].

Número de viviendas principales, secundarias y vacías por tamaño de municipio								
	Tamaño del municipio (habitantes)							
	Rural					Urbano		
	Pequeño rural				Gran rural	Pequeño urbano		Gran urbano
	< 100	101-500	501-1.000	1.001-5.000	5.001-20.000	20.001-50.000	50.001-100.000	≥101.000
Viviendas principales	27.015	292.345	310.420	1.725.765	3.337.130	2.769.005	2.234.165	7.329.785
	5.692.675					12.332.955		
Viviendas secundarias	57.985	306.300	211.980	650.630	839.070	582.320	406.330	491.395
	2.065.965					1.480.045		
Viviendas vacías	10.315	87.090	90.265	459.170	747.450	498.765	369.070	903.540
	1.394.290					1.771.375		
Total viviendas	9.152.930					15.584.375		

La distribución territorial muestra que el 31,6% de las viviendas principales se encuentran en municipios rurales, con una mayor presencia en los de menor tamaño (13,1% en "rural pequeño" y 18,5% en "gran rural"), mientras que el 68,4% restante se sitúa en áreas urbanas (tabla 45). En cuanto a las viviendas secundarias, su peso relativo es mayor en el medio rural, donde representan el 58,3% del total (34,6% en "rural pequeño" y 23,7% en "gran rural"), frente al 41,7% registrado en municipios urbanos.

Tabla 45. Porcentaje de viviendas principales, secundarias y vacías. Elaboración propia a partir de los datos del Atlas de la Edificación Residencial en España [206] y el modelo basado en CEE y datos en abierto, publicada en [202].

Porcentaje de viviendas principales, secundarias y vacías por tamaño de municipio								
	Tamaño del municipio (habitantes)							
	Rural					Urbano		
	Pequeño rural				Gran rural	Pequeño urbano		Gran urbano
	< 100	101-500	501-1.000	1.001-5.000	5.001-20.000	20.001-50.000	50.001-100.000	≥100.001
% viviendas principales	0,15%	1,62%	1,72%	9,57%	18,51%	15,36%	12,39%	40,66%
	31,6%					68,4%		
% viviendas secundarias	1,64%	8,64%	5,98%	18,35%	23,66%	16,42%	11,46%	13,86%
	58,3%					41,7%		
% viviendas vacías	0,33%	2,75%	2,85%	14,50%	23,61%	15,76%	11,66%	28,54%
	44,0%					56,0%		
% viviendas totales	0,39%	2,77%	2,48%	11,46%	19,90%	15,56%	12,17%	35,27%
	37,0%					63,0%		

En España, la proporción de viviendas secundarias o segundas residencias es más elevada en los municipios de menor tamaño, mientras que el porcentaje de viviendas principales aumenta conforme crece la población del municipio. Tal como se observa en la figura 41, la presencia de viviendas vacías se mantiene relativamente constante independientemente del tamaño del municipio. Sin embargo, en localidades con menos de 500 habitantes, las viviendas secundarias superan en número a las viviendas principales, lo que constituye una excepción a la tendencia general.

En conjunto, las viviendas principales representan el 62,2% del parque residencial en municipios rurales. Dentro de esta categoría, los municipios clasificados como "rural pequeño" (hasta 5.000 habitantes) presentan un porcentaje del 55,7%, mientras que en los municipios de mayor tamaño dentro del ámbito rural ("gran rural", hasta 20.000 habitantes), esta proporción se eleva al 67,8%.

Por otro lado, en los municipios urbanos, las viviendas principales alcanzan una representación del 79,1% del total. En los municipios clasificados como "pequeño urbano" (hasta 100.000 habitantes), este valor se sitúa en el 72,9%, mientras que en los de mayor tamaño ("gran urbano", con más de 100.001 habitantes), asciende al 84%.

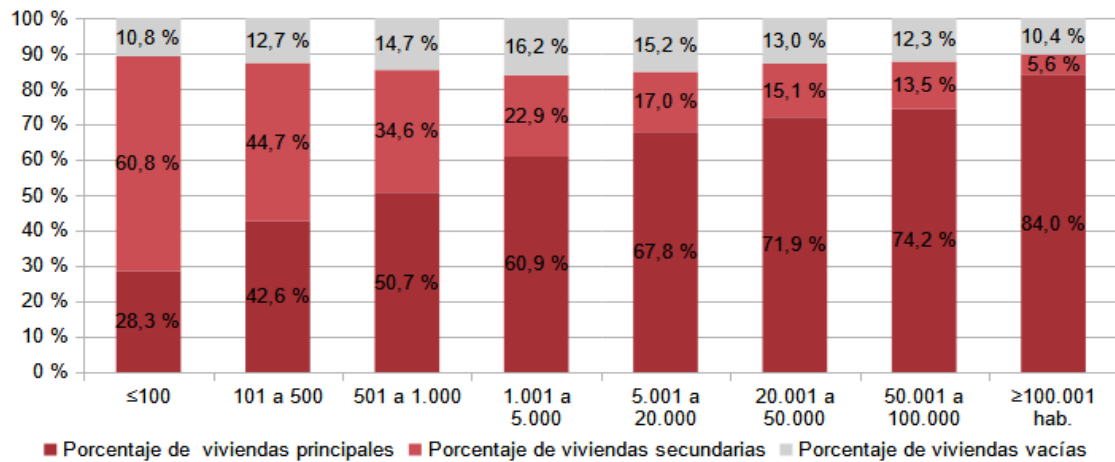


Figura 41. Porcentaje de viviendas principales, secundarias y vacías por tamaño de municipio. Elaboración propia a partir de los datos del Atlas de la Edificación Residencial en España [206] y el modelo basado en CEE y datos en abierto, publicada en [202].

En términos absolutos, los municipios clasificados como "gran rural" (con una población entre 5.001 y 20.000 habitantes) constituyen el segundo grupo con mayor número de viviendas principales en España, con un total de 3,33 millones de unidades, lo que representa el 18,51% del total. Esta categoría se encuentra solo por detrás de los municipios "gran urbano", que concentran 7,33 millones de viviendas principales (40,66%). De hecho, el grupo "gran rural" supera en número de viviendas principales tanto a los municipios urbanos con poblaciones entre 20.001 y 50.000 habitantes (2,77 millones, 15,36%) como a aquellos con poblaciones entre 50.001 y 100.000 habitantes (2,23 millones, 12,39%).

6.2.3.2. Características físicas del parque edificado rural

La figura 42 muestra la distribución de las viviendas según el número de plantas del edificio en función del tamaño del municipio. En las zonas rurales, predomina la edificación de baja altura, con un 66,8% de las viviendas ubicadas en edificios de una o dos plantas. Esta tendencia se intensifica en los municipios de menor tamaño, donde el porcentaje alcanza el 77,9% en la categoría "pequeño rural", mientras que en los municipios "gran rural" se sitúa en el 56,6%.

Por el contrario, en el entorno urbano prevalecen las edificaciones de mayor altura. En total, el 68,8% de las viviendas en estas áreas se encuentran en edificios de cuatro o más plantas. Este porcentaje varía dentro del entorno urbano, representando el 50,8% en los municipios clasificados como "pequeño urbano" y alcanzando el 82,6% en los municipios "gran urbano".

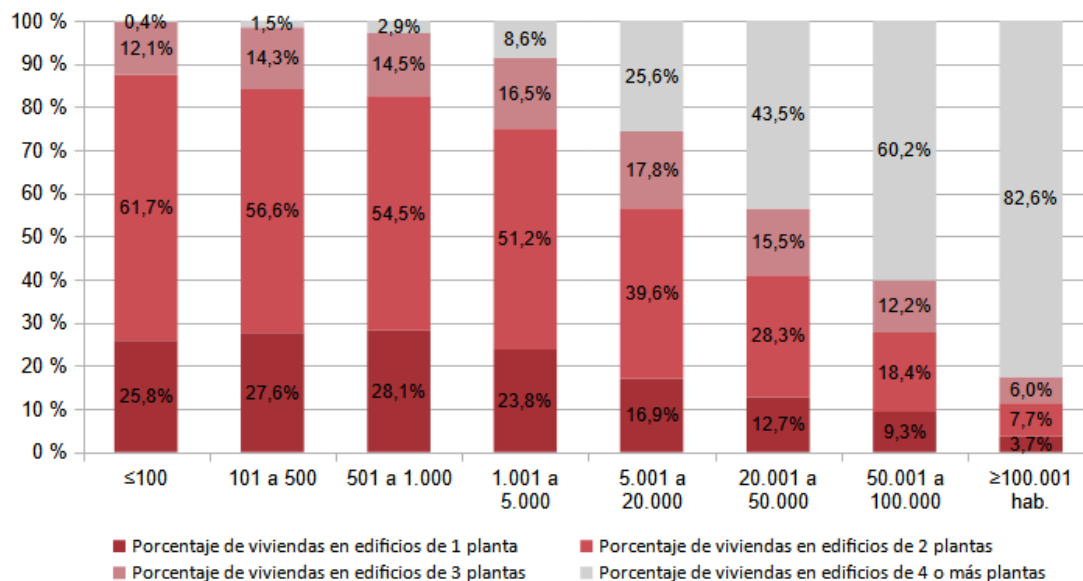


Figura 42. Porcentaje de viviendas por alturas del edificio por tamaño de municipio.
 Elaboración propia a partir de los datos del Atlas de la Edificación Residencial en España [206] y el modelo basado en CEE y datos en abierto, publicada en [202].

El envejecimiento del parque edificado rural es un factor clave en la caracterización de sus propiedades físicas. Desde el punto de vista energético, en España se acostumbra a segmentar los edificios en seis periodos de construcción: hasta 1900, de 1901 a 1940, de 1941 a 1960, de 1961 a 1980, de 1981 a 2007 y de 2008 a 2011 [216]. Estos intervalos reflejan hitos técnicos y normativos que marcaron la evolución de las soluciones constructivas.

Los edificios anteriores a 1900 corresponden a la arquitectura tradicional, mientras que el periodo 1941-1960 coincide con el primer gran ciclo de expansión urbana, caracterizado por la proliferación de tipologías en bloque. Entre 1961 y 1980, se desarrolla el segundo ciclo expansivo, introduciendo modificaciones en los sistemas constructivos.

A partir de 1980, con la entrada en vigor de la Norma Básica de Edificación NBE-CT-79, se estableció por primera vez la obligatoriedad de incorporar aislamiento térmico en la envolvente de los edificios. Posteriormente, en 2008, la adopción del CTE impuso criterios mucho más estrictos en eficiencia energética. Como resultado, las edificaciones previas a la implementación del CTE se consideran energéticamente ineficientes, y aquellas construidas antes de 1980 se califican como altamente ineficientes debido a la ausencia de requisitos normativos en materia de aislamiento térmico.

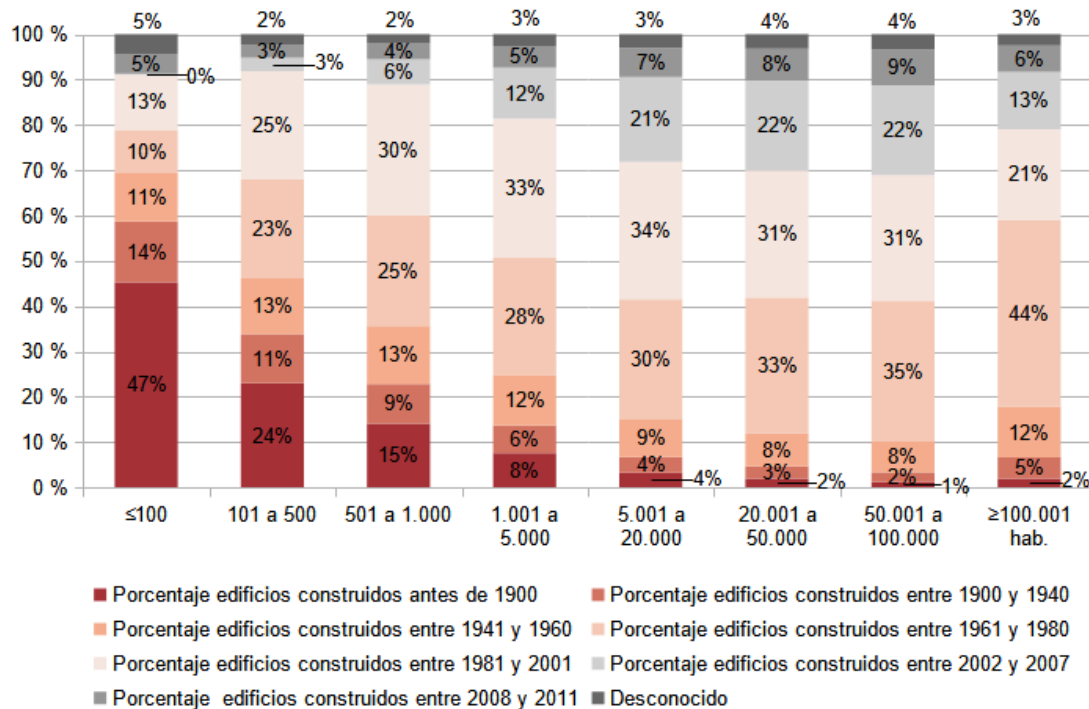


Figura 43. Porcentaje de viviendas según su año de construcción por tamaño de municipio. Elaboración propia a partir de los datos del Atlas de la Edificación Residencial en España [206] y el modelo basado en CEE y datos en abierto, publicada en [202].

La proporción de edificios construidos antes de 1980 es similar en áreas rurales y urbanas, con valores del 60,1% y 61,0%, respectivamente. Sin embargo, al analizar la distribución por tamaño de municipio, mostrada en la figura 43, se observa que las mayores concentraciones de edificaciones previas a 1980 se encuentran en municipios clasificados como "pequeño rural" (64,4%) y en la categoría "gran urbano" (65,4%). En contraste, los municipios "gran rural" y "pequeño urbano" presentan menores proporciones, con valores del 57,1% y 53,8%, respectivamente.

Esta distribución refleja un patrón común en la antigüedad del parque edificado, con una mayor concentración de edificios antiguos tanto en los municipios de menor tamaño como en los de mayor tamaño.

La superficie de las viviendas es un factor determinante en la caracterización energética del parque residencial rural, ya que influye directamente en el consumo energético, en los costes operativos y en la inversión necesaria para acometer las intervenciones de rehabilitación.

La figura 44 presenta la distribución del parque de viviendas según su tamaño, considerando los siguientes intervalos de superficie útil:

- Menor o igual que 30 m²
- Mayor de 30 m² hasta 45 m²
- Mayor de 45 m² hasta 60 m²
- Mayor de 60 m² hasta 75 m²
- Mayor de 75 m² hasta 90 m²
- Mayor de 90 m² hasta 105 m²
- Mayor de 105 m² hasta 120 m²
- Mayor de 120 m² y hasta 150 m²
- Mayor de 150 m² y hasta 180 m²
- Mayor de 180 m²

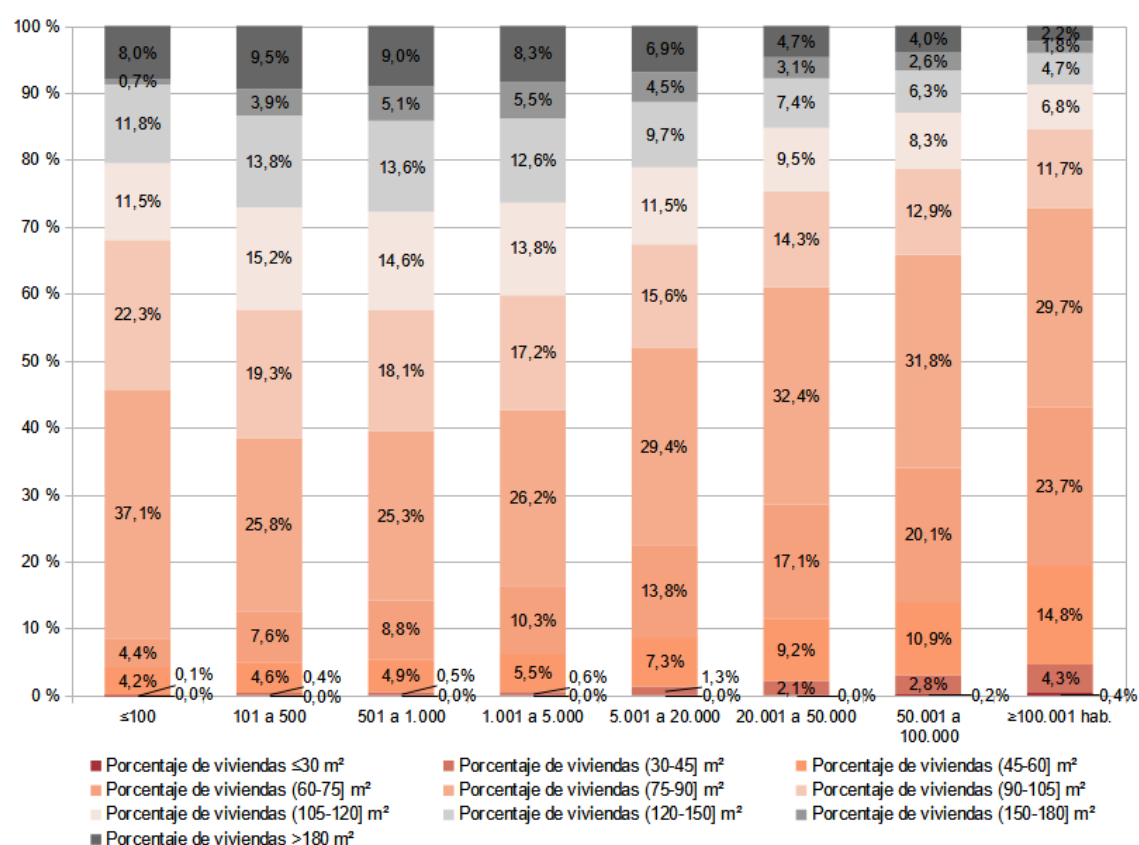


Figura 44. Porcentaje de viviendas principales según superficie útil de vivienda por tamaño de municipio. Elaboración propia a partir de los datos del Atlas de la Edificación Residencial en España [206] y el modelo basado en CEE y datos en abierto, publicada en [202].

Los datos reflejan que, en todos los tipos de municipios, el intervalo de 75 m² a 90 m² es el más frecuente. Sin embargo, los rangos de superficie predominantes tras este varían según el tamaño del municipio. En las localidades clasificadas como "pequeño rural", los siguientes grupos más representativos corresponden a viviendas de entre 90 m² y 105 m², así como aquellas entre 105 m² y 120 m². En

cambio, en los municipios de tipo "gran rural", "pequeño urbano" y "gran urbano", los rangos con mayor presencia tras el predominante son los de 60 m² a 75 m² y 90 m² a 105 m².

La figura 45 muestra las superficies útiles en tres categorías principales, permitiendo identificar un patrón territorial claro: si bien las viviendas de tamaño intermedio (superiores a 75 m² y hasta 120 m²) son mayoritarias en todas las áreas, en los municipios rurales existe una mayor proporción de viviendas de gran tamaño (más de 120 m²). En contraste, en las zonas urbanas prevalecen las viviendas de menor superficie (inferiores a 75 m²).

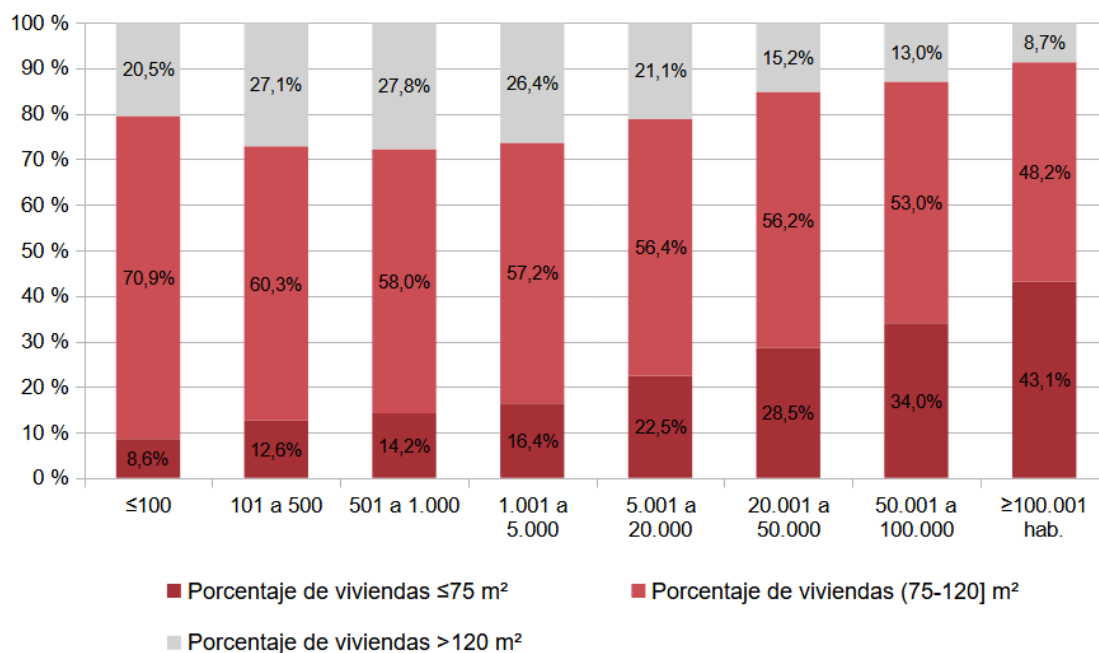


Figura 45. Porcentaje de viviendas principales grandes (mayores de 120 m²), medianas (mayores de 75 y hasta 120 m²) o pequeñas (de 75 m² o menores), por tamaño de municipio. Elaboración propia a partir de los datos del Atlas de la Edificación Residencial en España [206] y el modelo basado en CEE y datos en abierto, publicada en [202].

La figura 46 muestra la superficie útil media de las viviendas principales en función del tamaño del municipio. Para su cálculo, se ha empleado un valor representativo de cada intervalo de superficie útil definido en la figura 44, multiplicándolo por el número de viviendas correspondiente. Como criterio general, se ha tomado el valor medio de cada rango, con dos excepciones: para las viviendas de hasta 30 m² se ha considerado una media de 20 m², mientras que para aquellas con más de 180 m² se ha adoptado un valor de 323 m², obtenido a partir de ofertas de venta de viviendas en la plataforma Idealista en toda España con datos del 9 de noviembre de 2022 [202].

Los resultados reflejan una notable variabilidad en la superficie útil media de las viviendas principales según el tamaño del municipio. En general, en los

municipios rurales las viviendas presentan una superficie útil media de 112,8 m², lo que supone un 24,5% más que en urbanas, donde se sitúa en 90,6 m².

Al detallar por categorías específicas de municipios, las diferencias se acentúan. En los municipios de hasta 5.000 habitantes (pequeño rural), la superficie útil media alcanza los 118,1 m², mientras que en los de tipo gran rural (entre 5.001 y 20.000 habitantes) es de 109,2 m². En cambio, en los municipios clasificados como pequeño urbano (hasta 100.000 habitantes), la media desciende a 97,4 m², y en los de tipo gran urbano (más de 100.000 habitantes) se reduce aún más, situándose en 85,9 m².

Estos valores reflejan diferencias significativas: la superficie útil media en los municipios de pequeño rural es un 30,4% mayor que en los urbanos en general y un 37,5% mayor que en los de gran urbano. Por su parte, las viviendas principales en los municipios de gran rural superan en un 20,5% la media de las zonas urbanas y en un 27,1% la de los municipios de gran urbano.

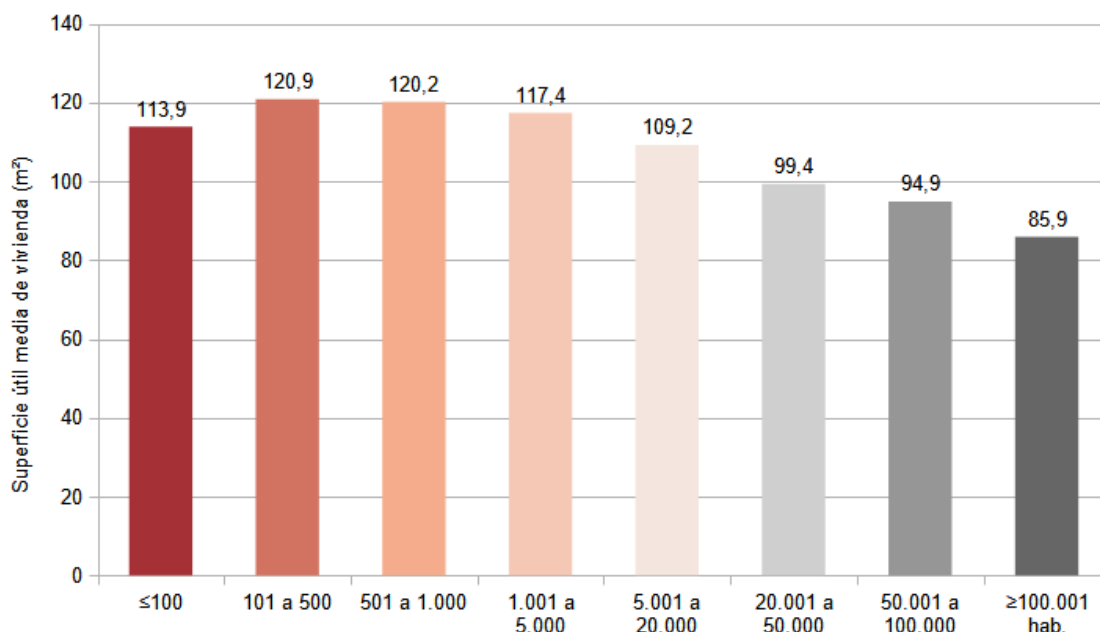
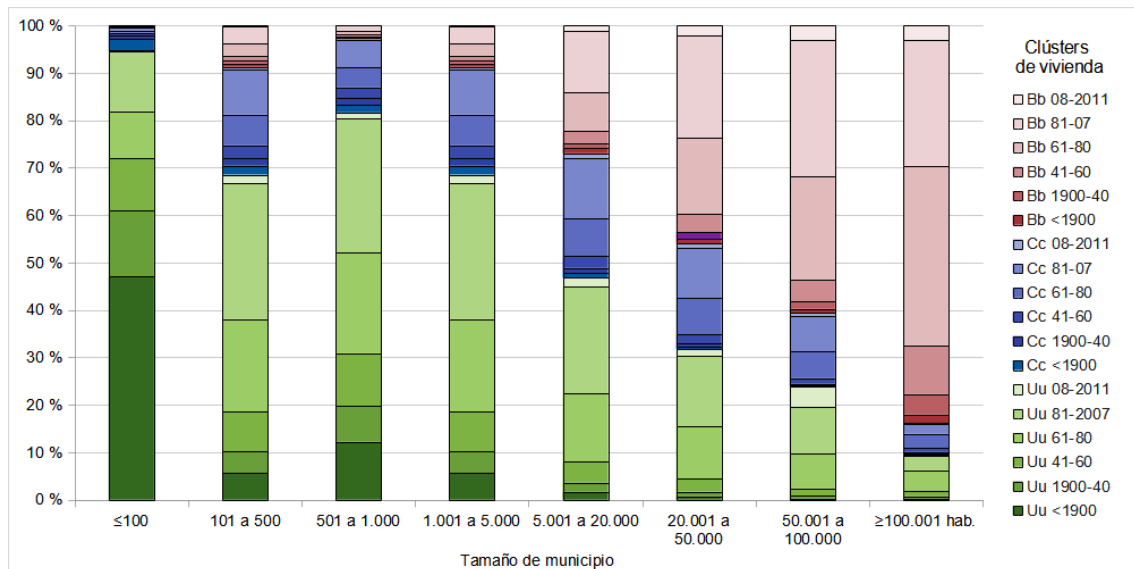
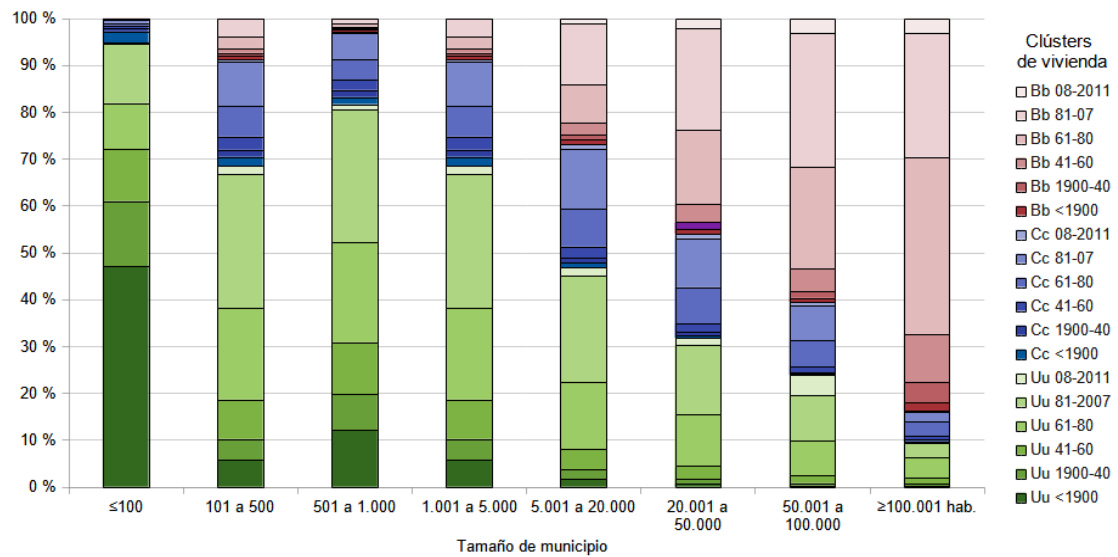


Figura 46. Superficie útil media (m²) por tamaño de municipio de las viviendas principales.
Elaboración propia a partir de los datos del Atlas de la Edificación Residencial en España [206] y el modelo basado en CEE y datos en abierto, publicada en [202].

Para caracterizar energéticamente las viviendas ubicadas en municipios rurales, se han empleado los clústeres de vivienda definidos en la ERESEE 2020 [5]. Estos clústeres diferencian los perfiles energéticos de las viviendas en función de su tipología y año de construcción. Se establecen tres grandes grupos: viviendas unifamiliares, edificios plurifamiliares de hasta tres alturas y edificios plurifamiliares de cuatro o más alturas. Dentro de cada grupo, se distingue entre seis periodos constructivos: hasta 1900, 1901-1940, 1941-1960, 1961-1980, 1981-2007 y 2008-2011.

6. Aplicabilidad de los modelos

6.2. Análisis del parque edificado a gran escala



Las figuras 47 y 48 ilustran la distribución porcentual de estos clústeres en función del tamaño del municipio, destacando la elevada presencia de viviendas unifamiliares construidas antes de la implementación del CTE en los municipios clasificados como pequeño rural.

Tabla 46. Número de viviendas por clúster y tamaño de municipio. Elaboración propia a partir del Atlas de la Edificación Residencial en España [206] y el modelo basado en CEE y datos en abierto, publicada en [202]. Uu: unifamiliares; Cc: plurifamiliares de 3 o menos alturas; Bb: plurifamiliares de 4 o más alturas; <1900: antes de 1900; 1901-40: entre 1901 y 1940; 41-60: entre 1941 y 1960; 61-80: entre 1961 y 1980; 81-07: entre 1981 y 2007; 08-2011: entre 2008 y 2011.

Nº de viviendas por clúster y tamaño de municipio								
	Tamaño del municipio (habitantes)							
	Rural					Urbano		
	Pequeño rural				Gran rural	Pequeño urbano		Gran urbano
	≤ 100	101-500	501-1.000	1.001-5.000	5.001-20.000	20.001-50.000	50.001-100.000	≥100.001
Uu ≤1900	43.048	138.172	70.511	150.787	77.784	24.807	8.091	16.950
Uu 1901-40	12.770	65.407	44.190	120.772	85.560	35.655	14.469	41.209
Uu 41-60	10.093	73.877	64.264	223.398	198.630	95.246	46.411	98.882
Uu 61-80	9.044	132.190	122.745	516.393	645.252	389.151	213.849	363.921
Uu 81-07	11.684	155.470	164.256	763.312	1.017.094	529.882	281.969	254.785
Uu 08-2011	72	4.579	6.812	45.617	83.212	48.946	119.393	29.534
Total Uu	86.711	569.694	472.778	1.820.280	2.107.532	1.123.687	684.183	805.281
Cc <1900	2.219	17.647	8.816	49.997	43.675	17.365	6.104	11.682
Cc 1901-40	658	8.354	8.816	40.044	48.041	24.958	10.915	28.402
Cc 41-60	520	9.435	12.821	74.072	111.528	66.671	35.010	68.151
Cc 61-80	466	16.883	24.489	171.220	362.300	272.403	161.315	250.819
Cc 81-07	602	19.856	32.771	253.091	571.084	370.914	212.701	175.601
Cc 08-2011	4	585	1.359	15.125	46.722	34.262	23.171	20.355
Total Bloque Cc	4.470	72.760	89.073	603.550	1.183.349	786.573	449.215	555.009
Bb <1900	171	2.462	2.548	19.221	44.756	35.908	23.626	148.094
Bb 1901-40	51	1.166	1.597	15.395	49.230	51.611	42.250	360.040
Bb 41-60	40	1.317	2.323	28.476	114.288	137.869	135.520	863.932
Bb 61-80	36	2.356	4.436	65.824	371.267	563.302	624.436	3.179.571
Bb 81-07	46	2.771	5.936	97.299	585.218	767.011	823.345	2.226.056
Bb 08-2011	0	82	246	5.815	47.879	70.851	89.693	258.038
Total Bloque Bb	344	10.153	17.087	232.029	1.212.637	1.626.552	1.738.870	7.035.731
Total viviendas	91.525	652.607	578.939	2.655.859	4.503.518	3.536.813	2.872.269	8.396.021

En la tabla 46 se detalla el número de viviendas de cada clúster por tamaño de municipio, basándose en los datos del Atlas de la Edificación Residencial en España. Se ha asumido un margen de error mínimo debido a la falta de información completa en un pequeño porcentaje de viviendas. Además, los cinco clústeres más representativos en cada categoría de municipio están resaltados en gris.

El análisis revela que, en los municipios con menos de 1.000 habitantes, predominan las viviendas unifamiliares construidas antes del CTE. En municipios de entre 1.001 y 5.000 habitantes, los clústeres más frecuentes corresponden a viviendas unifamiliares edificadas entre 1941 y 2007, junto con edificios de hasta tres alturas construidos entre 1961 y 2007. En el caso de los municipios con poblaciones entre 5.001 y 20.000 habitantes, los clústeres más representativos incluyen viviendas unifamiliares del periodo 1961-2007, edificios de hasta tres alturas construidos entre 1981 y 2007 y edificios de cuatro o más alturas levantados entre 1961 y 2007.

La tabla 47 desglosa el número de viviendas principales en cada clúster según el tamaño del municipio, marcando en gris los cinco clústeres más representativos de cada tipo de municipio rural.

Los resultados indican lo siguiente:

- Para los municipios con hasta 1.000 habitantes, las viviendas unifamiliares construidas antes de la aplicación del CTE son las más representativas.
- En los municipios con una población entre 1.001 y 5.000 habitantes, predominan las viviendas unifamiliares construidas entre 1941 y 2007, así como las viviendas en bloques de tres alturas o menos, construidas entre 1961 y 2007.
- En los municipios con una población entre 5.001 y 20.000 habitantes, los clústeres más comunes son las viviendas unifamiliares construidas entre 1961 y 2007, las viviendas en bloques de tres alturas o menos construidas entre 1981 y 2007, y las viviendas en bloques de cuatro o más alturas construidas entre 1961 y 2007.

Tabla 47. Número de viviendas principales por clúster y tamaño de municipio. Elaboración propia a partir de los datos del Atlas de la Edificación Residencial en España [206] y el modelo basado en CEE, publicada en [202]. Uu: unifamiliares; Cc: plurifamiliares de 3 o menos alturas; Bb: plurifamiliares de 4 o más alturas; <1900: antes de 1900; 1901-40: entre 1901 y 1940; 41-60: entre 1941 y 1960; 61-80: entre 1961 y 1980; 81-07: entre 1981 y 2007; 08-2011: entre 2008 y 2011.

Nº de viviendas principales por clúster y tamaño de municipio								
	Tamaño del municipio (habitantes)							
	Rural					Urbano		
	Pequeño rural				Gran rural	Pequeño urbano		Gran urbano
	< 100	101-500	501-1.000	1.001-5.000	5.001-20.000	20.001-50.000	50.001-100.000	>100.000
Uu <1900	12.201	58.906	35.726	91.771	52.720	17.841	6.007	14.240
Uu 1900-40	3.619	27.884	22.390	73.503	57.990	25.643	10.741	34.620
Uu 41-60	2.861	31.495	32.561	135.963	134.627	68.501	34.454	83.073
Uu 61-80	2.563	56.356	62.192	314.284	437.336	279.880	158.752	305.736
Uu 81-07	3.312	66.280	83.224	464.563	689.361	381.094	209.321	214.049
Uu 08-2011	21	1.952	3.451	27.763	56.399	35.203	88.632	24.812
Total Uu	24.576	242.874	239.543	1.107.848	1.428.434	808.162	507.907	676.530
Cc <1900	629	7.523	4.467	30.429	29.602	12.489	4.531	9.815
Cc 1900-40	187	3.561	4.467	24.372	32.561	17.950	8.103	23.861
Cc 41-60	147	4.023	6.496	45.081	75.591	47.950	25.990	57.255
Cc 61-80	132	7.198	12.408	104.207	245.558	195.914	119.753	210.717
Cc 81-07	171	8.465	16.604	154.035	387.067	266.763	157.900	147.525
Cc 08-2011	1	249	689	9.205	31.667	24.642	17.201	17.101
Total Bloque Cc	1.267	31.019	45.131	367.329	802.045	565.708	333.477	466.273
Bb <1900	48	1.050	1.291	11.698	30.334	25.826	17.539	124.416
Bb 1900-40	14	497	809	9.369	33.367	37.119	31.365	302.476
Bb 41-60	11	561	1.177	17.331	77.462	99.156	100.604	725.804
Bb 61-80	10	1.004	2.248	40.061	251.636	405.130	463.553	2.671.211
Bb 81-07	13	1.181	3.008	59.217	396.646	551.638	611.214	1.870.148
Bb 08-2011	0	35	125	3.539	32.451	50.956	66.584	216.782
Total Bloque Bb	97	4.328	8.657	141.216	821.896	1.169.825	1.290.859	5.910.836
Total viviendas	25.941	278.222	293.332	1.616.393	3.052.375	2.543.695	2.132.243	7.053.639

6.2.3.3. Características energéticas del parque edificado rural

Para evaluar el consumo energético de las viviendas en zonas rurales, se utiliza el modelo desarrollado en el capítulo 4. En la figura 49 se muestra que las viviendas ubicadas en áreas rurales presentan un CEPNR más elevado que las situadas en áreas urbanas.

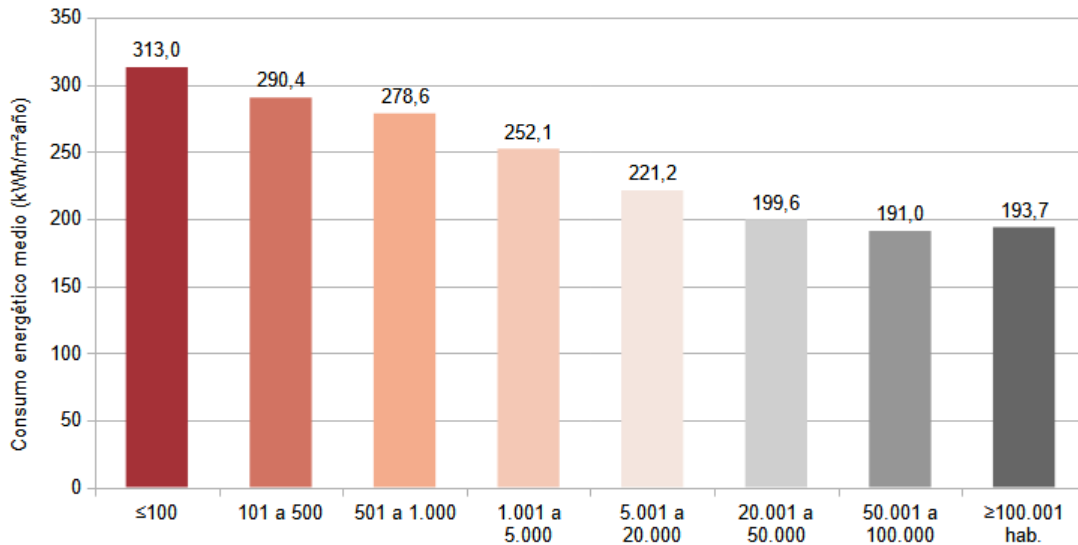


Figura 49. CEPNR medio por m² de vivienda (kWh/m²año) y por tamaño de municipio. Elaboración propia a partir del modelo basado en CEE y datos en abierto, publicada en [202].

Se puede apreciar en la figura como el CEPNR aumenta a medida que disminuye el tamaño del municipio. De acuerdo con los CEE en abierto en España, el consumo energético medio de las viviendas rurales por metro cuadrado es de 240,6 kWh/m²a, lo que representa un 23,6% más que el de las viviendas urbanas, que es de 194,6 kWh/m²a.

Desglosado por tipo de municipio:

- En los municipios clasificados como rural pequeño, el CEPNR es de 263,6 kWh/m²a.
- En los municipios de rural grande, el CEPNR es de 221,2 kWh/m²a.
- En los municipios de urbano pequeño, el CEPNR es de 195,8 kWh/m²a.
- En los municipios de urbano grande, el CEPNR es de 193,7 kWh/m²a.

Como se observa en la figura 50, al combinar el CEPNR con las superficies de las viviendas principales en los núcleos rurales, se obtiene el consumo energético medio por vivienda principal. Los datos muestran que el consumo energético medio de una vivienda principal en municipios rurales es de 26.804,5 kWh/año es un 52,0% superior al de una vivienda principal en municipios urbanos, de 17.631,8 kWh/año, según los CEE emitidos en España.

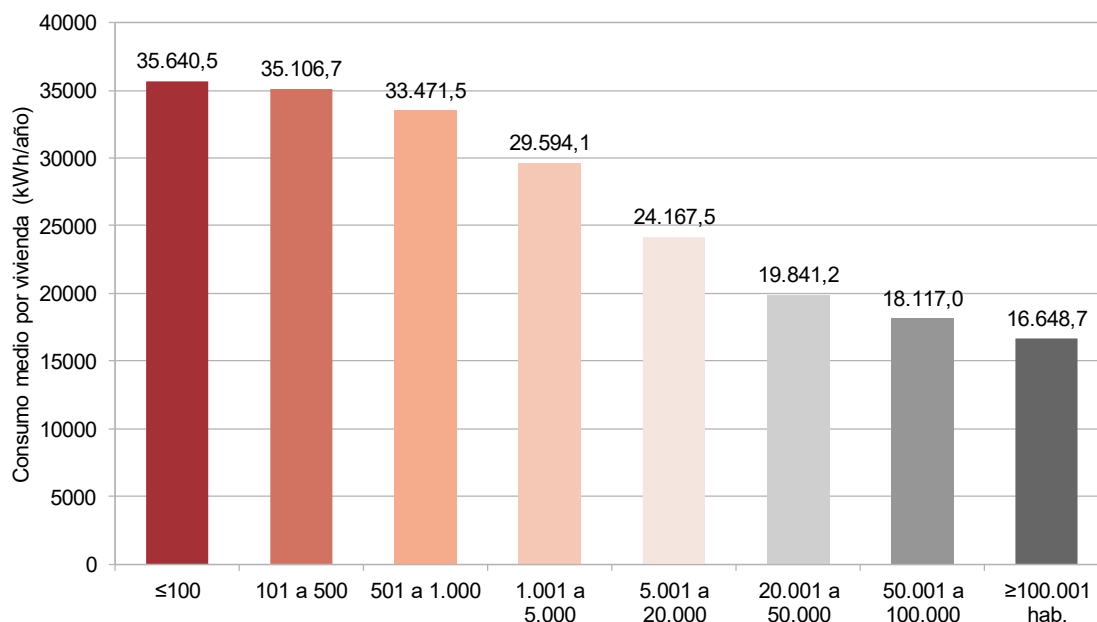


Figura 50. CEPNR medio por vivienda principal (kWh/año) por tamaño de municipio.
 Elaboración propia a partir del modelo basado en CEE y datos en abierto, publicada en [202].

Las viviendas rurales no solo tienen un consumo energético por metro cuadrado más alto, sino que también el tamaño de las viviendas principales contribuye significativamente al aumento del consumo total en comparación con las viviendas urbanas. En el ámbito rural pequeño, el CEPNR medio de una vivienda principal es de 30.741,3 kWh/año, lo que representa un 27,2% más que el consumo en los municipios de rural grande, donde el promedio es de 24.167,5 kWh/año. Este valor es un 61,2% superior al consumo energético en viviendas principales de municipios de urbano pequeño (19.070,9 kWh/año) y un 84,6% más alto en comparación con las viviendas en rural grande (16.648,7 kWh/año).

Se ha realizado un cálculo del CEPNR total en MWh/a del parque de viviendas principales en España, considerando los diferentes tamaños de municipio, como se ilustra en la figura 51. Los datos muestran que el parque residencial en municipios rurales representa el 41,4% del CEPNR total. Dentro de este grupo, los municipios rurales pequeños comprenden el 19,6% de dicho consumo, mientras que los municipios rurales grandes contribuyen con un 21,8%.

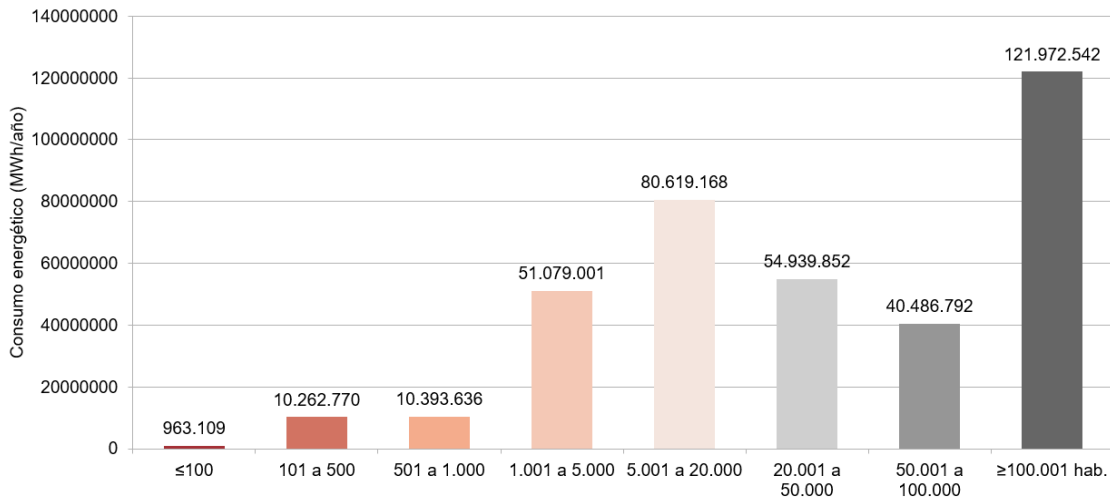


Figura 51. Consumo energético total (Mwh/año) del parque residencial español de viviendas principales para los diferentes tamaños de municipio. Elaboración propia a partir del modelo basado en CEE y datos en abierto, publicada en [202].

La figura 52 ilustra el análisis sobre las emisiones medias de GEI. En las viviendas rurales las emisiones, con valores medios de 53,1 kgCO_{2eq}/m²a, son un 28,0% más altas que las correspondientes a las viviendas urbanas, 41,8 kgCO_{2eq}/m²a. En particular, en los municipios rurales pequeños, las emisiones medias alcanzan los 58,6 kgCO_{2eq}/m²a, mientras que, en los municipios rurales grandes, el valor se reduce a 48,4 kgCO_{2eq}/m²a. En los municipios urbanos pequeños, las emisiones se sitúan en 42,1 kgCO_{2eq}/m²a, y en los municipios urbanos grandes, se reducen ligeramente a 41,6 kgCO_{2eq}/m²a, según los mismos datos.

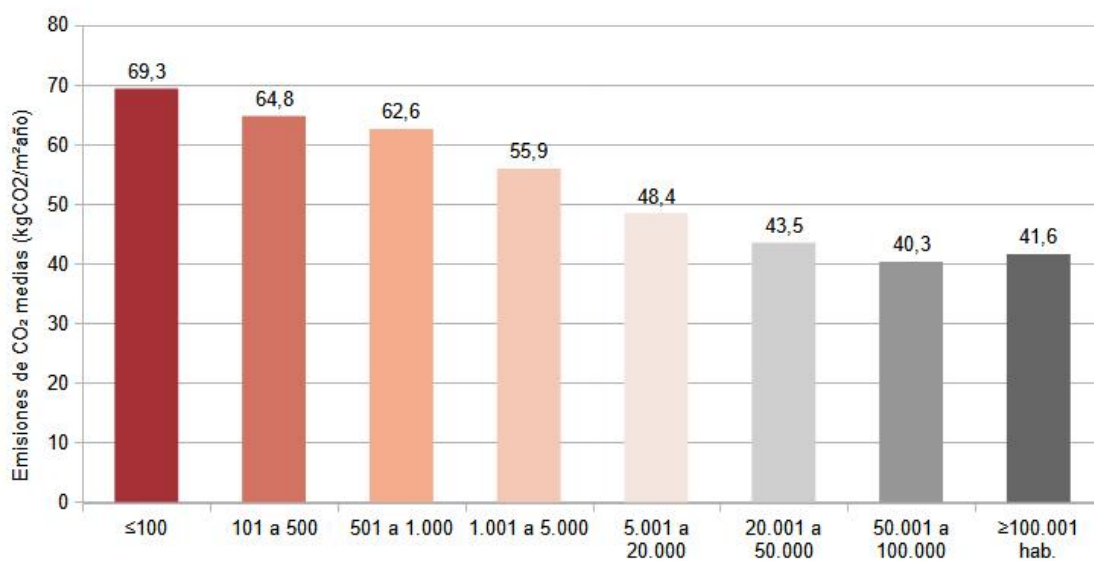


Figura 52. Emisiones de GEI medias (kgCO_{2eq}/m²a) por tamaño de municipios. Elaboración propia a partir del modelo basado en CEE y datos en abierto, publicada en [202].

Por último, la figura 53 presenta las emisiones de GEI totales de CO_{2eq} en toneladas por año del parque residencial español, desglosadas según el tamaño de los municipios, basándose en los datos de los CEE. Se observa que el parque residencial en municipios rurales es responsable del 42,0% de las emisiones totales. Dentro de este grupo, los municipios rurales pequeños aportan el 20,1%, mientras que los municipios rurales grandes representan el 21,9% de las emisiones.

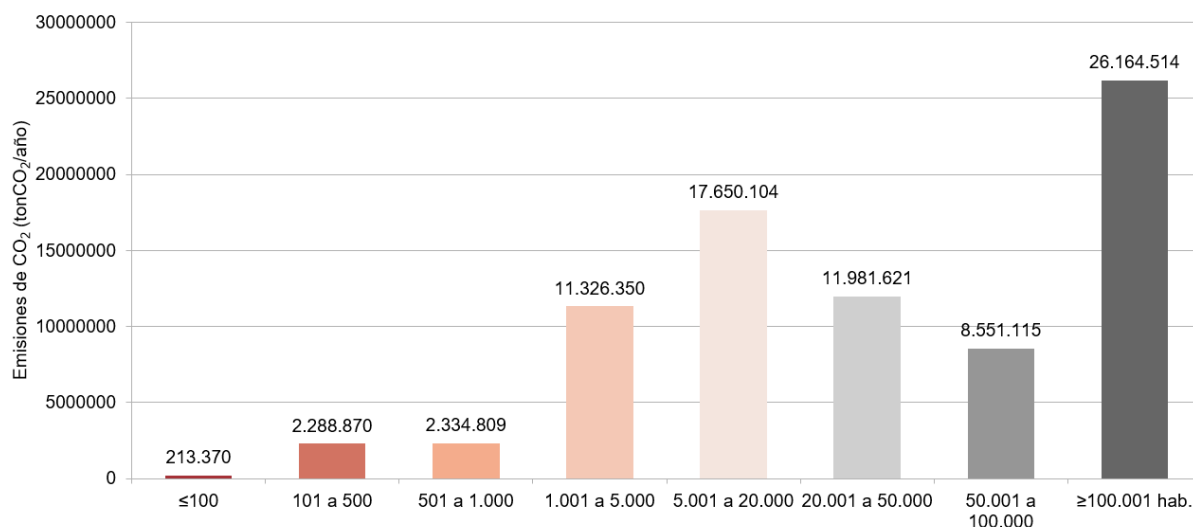


Figura 53. Emisiones de GEI (tonCO_{2eq}/m²a) del parque residencial español de viviendas principales por tamaño de municipios. Elaboración propia a partir del modelo basado en CEE y datos en abierto, publicada en [202].

En resumen, el CEPNR medio de la vivienda en ámbito rural por metro cuadrado, de 240,6 kWh/m²a, es un 23,6% superior al de la vivienda urbana, de 194,6 kWh/m²a, según los CEE emitidos en España en abierto. A medida que disminuye el tamaño del municipio en el que se ubica la vivienda, los consumos energéticos por metro cuadrado aumentan. Así, en los municipios de la categoría rural pequeño, el consumo medio de la vivienda por metro cuadrado es 263,6 kWh/m²a, mientras que en rural grande es 221,2 kWh/m²a, en urbano pequeño 195,8 kWh/m²a, y en urbano grande 193,7 kWh/m²a.

Al considerar el CEPNR por vivienda principal, en lugar de por metro cuadrado, las diferencias entre las viviendas rurales y urbanas son aún más notorias. El CEPNR medio de una vivienda principal en municipios rurales, de 26.804,5 kWh/a, supera en un 52,0% al de una vivienda principal en municipios urbanos de 17.631,8 kWh/a. Específicamente, en los municipios de la categoría rural pequeño, el consumo de una vivienda principal, 30.741,3 kWh/a, es un 27,2% superior al de los municipios de rural grande, 24.167,5 kWh/a, un 61,2% superior al de las viviendas principales de los municipios urbanos pequeños, 19.070,9 kWh/a, y un 84,6% superior al de las viviendas de rural grande, 16.648,7 kWh/a.

Esta notable diferencia se debe principalmente a la superficie media de las viviendas en los diferentes tipos de municipios, ya que una vivienda más grande tiene a consumir más energía. En los municipios rurales, la superficie útil media de las viviendas es de 112,8 m², lo que representa un 24,5% más que en los municipios urbanos, donde la media es de 90,6 m². Las diferencias aumentan al desglosar los municipios por categorías más detalladas: en los municipios de rural pequeño, la superficie media es de 118,1 m², mientras que en los de rural grande es de 109,2 m², en urbano pequeño es de 97,4 m², y en gran urbano es de 85,9 m².

Al analizar el CEPNR total y las emisiones de GEI totales del parque español de viviendas principales, se observa que las viviendas rurales representan el 41,4% de los consumos y el 42,0% de las emisiones, según los CEE.

El análisis de las tipologías de vivienda según el tamaño del municipio ha identificado aquellos con mayor representación en el ámbito rural. Estas tipologías, con una mayor proporción de los edificios rurales poseen un potencial de descarbonización interesante si se diseñan políticas y medidas enfocadas a ellos. Estas tipologías son:

- En los municipios menores a 1.001 habitantes, son las unifamiliares anteriores al CTE.
- En los municipios entre 1.001 y 5.000 habitantes, consisten en las unifamiliares edificadas de 1941 a 2007 y las viviendas en bloques de 3 alturas o menos erigidas entre 1961 y 2007, todas ellas anteriores al CTE.
- En los municipios entre 5.001 y 20.000 habitantes, son las unifamiliares del período 1961-2007, las viviendas en bloque de 3 alturas o menos de 1981 y 2007 y en bloque de 4 y más alturas de 1961-2007.

Finalmente, fundamentada en el modelo del capítulo 4, se muestra en la figura 54 una comparación entre el CEPNR medio y las emisiones de GEI medias entre los núcleos urbanos y rurales en España por Comunidades Autónomas. Como se puede apreciar a nivel nacional existe una fuerte variación del consumo y las emisiones medias, siendo un 17,8% y un 20,3% respectivamente más altas en el ámbito rural respecto al urbano. Si se estudia por CCAA, la única excepción son las Islas Baleares con un consumo urbano ligeramente superior al rural. La CCAA con mayor diferencia en el CEPNR entre rural y urbano es la Comunidad de Madrid seguida de Cataluña y La Rioja, mientras que, respecto a las emisiones, la mayor diferencia se da en Castilla y León seguida de Madrid y Cataluña.



Figura 54. Izquierda: Consumo de Energía Primaria No Renovable (kWh/m²a) en núcleos urbanos y rurales por Comunidad Autónoma. Derecha: Emisiones de GEI (kgCO_{2eq}/m²a) medias en núcleos urbanos y rurales por Comunidad Autónoma. Elaboración propia, publicada en [100].

6.2.4. Análisis del estado de la certificación energética

El progreso de la certificación energética es cada vez mayor y las metodologías y modelos desarrollados en esta tesis permiten estudiar su avance y cómo es la distribución de los CEE en el parque edificado.

En la figura 55 se muestran los CEE, inmuebles y superficie certificada por clase de emisiones de GEI, tanto para uso residencial como no residencial registrados en bases de datos en abierto. Esta figura es una variación del indicador de la EPBD ‘Número de certificados de eficiencia energética: por clase de eficiencia energética’. En esta figura se desglosa la información, lo que permite comparar el estado del parque edificado certificado en uso residencial y no residencial, conocer la diferencia por inmuebles (vivienda en el uso residencial) y locales, oficinas, etc. en el no residencial, así como la superficie edificada que representan estos certificados.



Figura 55. Número y porcentaje de CEE, inmuebles y superficie certificada por clase de emisiones de GEI y uso residencial y no residencial. Elaboración propia.

En el uso residencial se aprecia lo extendida que está la clase E, siendo más de la mitad del parque residencial. Las tres peores letras (E, F y G) representan el 77,3% de los CEE mientras que las letras más eficientes (A, B y C) representan un 8%. En cuanto al número de inmuebles, los porcentajes de las primeras letras mejoran ligeramente, ya que los edificios nuevos suelen certificarse con un CEE del edificio completo mientras que los existentes a través de alquiler o venta de inmuebles individuales.

En el uso no residencial, la situación es diferente, con las tres primeras letras y las tres últimas representando el 39,7% de los CEE. Y si analizamos por bienes inmuebles y por superficie construida, las tres primeras letras representan una mayor cantidad del parque edificado. Esta distinción es importante para poder conocer las diferencias entre ambos usos, y establecer sus trayectorias de rehabilitación y sus objetivos de manera adecuada.

En la figura 56 se muestra una distribución de las letras de emisiones de GEI por cada CCAA que ofrece sus datos en abierto. Se aprecia cómo las diferentes CCAA muestran unos resultados diferentes, siendo la más distinta las Canarias, con un 54,8% de edificios en clase G, posiblemente debido a unos valores de emisiones más estrictos en ese clima que en la península y a que el buen clima ha implicado unas necesidades de aislamiento y eficiencia que hasta la llegada del código técnico no se planteaban. En el resto de las CCAA predomina la clase E ampliamente, encontrando las mayores cantidades de las peores clases

energéticas en Asturias, Baleares Madrid y Galicia. Este desglose puede ayudar a enfocar las ayudas a la rehabilitación de las CCAA y estudiar su evolución y si las estrategias en cada CCAA están siendo más o menos efectivas.

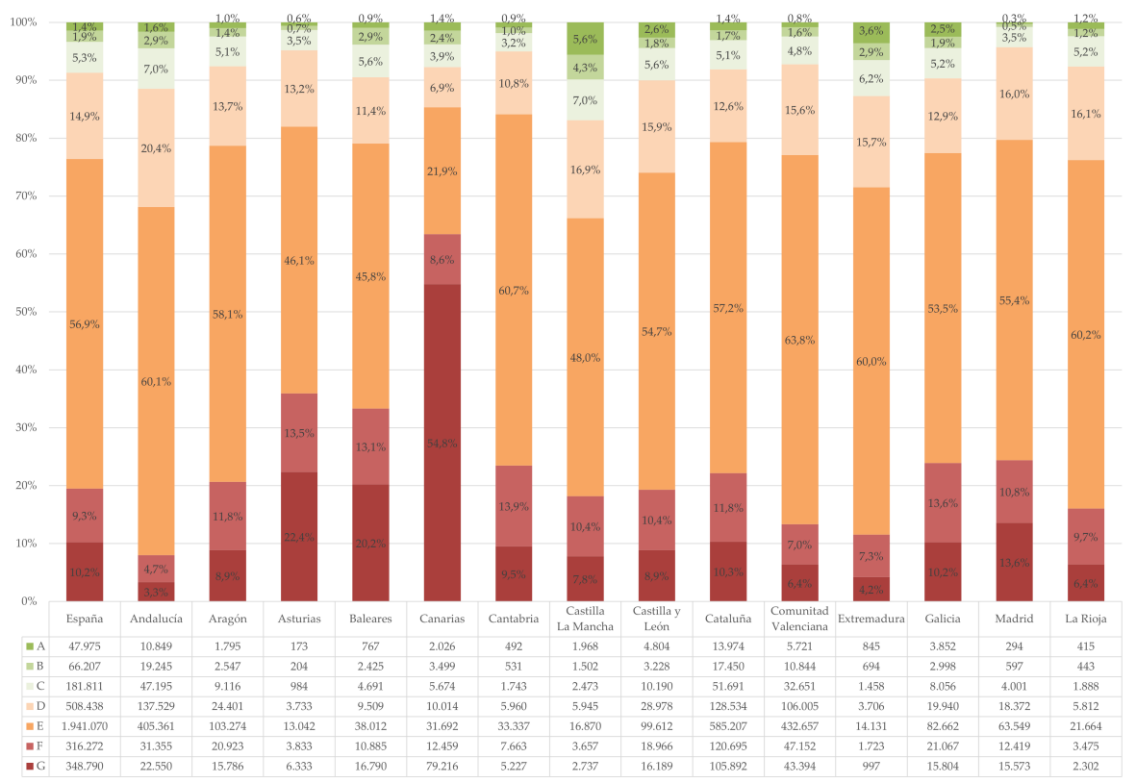


Figura 56. Distribución de las clases de emisiones de GEI de los CEE por Comunidad Autónoma. Elaboración propia.

La figura 57 muestra una interpretación alternativa del indicador de la EPBD ‘Número de certificados de eficiencia energética: por tipo de edificio’. Al desglosar los datos, no por el número de certificado sino por la letra de emisiones de cada certificado, se conoce cómo se distribuyen las calificaciones energéticas en función de los distintos periodos de la normativa en cuanto a la construcción y eficiencia energética. Los datos muestran un parque edificado que en los periodos de 1941 a 1960 ha ido aumentando su consumo energético, hasta 1980 con la introducción de la NBE-CT-79 [141] que tienen una ligera mejora, cambiando la tendencia. En el año 2008 con la entrada en vigor del CTE y con cada una de las versiones del DB-HE se da una mejora muy significativa del comportamiento energético de los edificios.

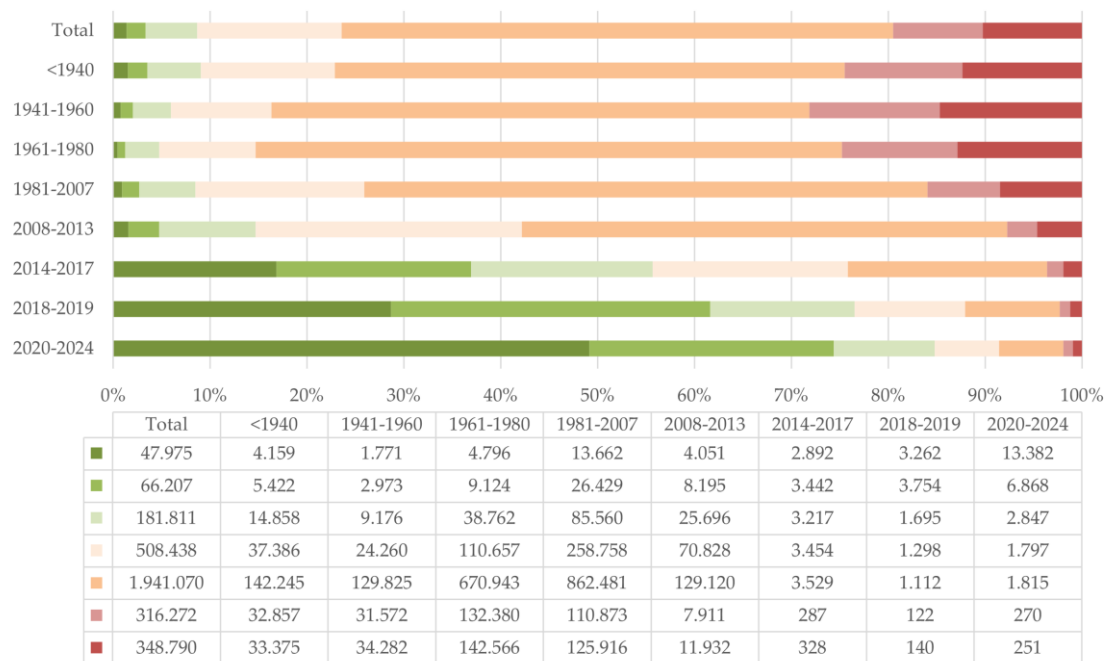


Figura 57. Distribución de las clases de emisiones de GEI de los CEE por periodo de construcción. Elaboración propia.

Aunque aún queda un largo recorrido para descarbonizar el parque edificado, dado que las clases más eficientes siguen representando un porcentaje mínimo en el total de los edificios, se puede observar un avance significativo en la eficiencia energética en la obra nueva, así como el impacto positivo de las rehabilitaciones energéticas realizadas en periodos anteriores. Es destacable la mejora que hay en la eficiencia de los edificios en los periodos de 2018 a 2024, con cambios en el CTE que implican unos estándares de eficiencia energética. Resulta notable en estas dos últimas categorías la presencia todavía relevante de clases energéticas D, E, F y G, ya que con la legislación vigente no es posible obtener estos valores. Analizando estos casos se han identificado unas posibles fuentes de los errores. Parcelas catastrales con un CEE de un edificio que ha sido demolido y donde el CEE del edificio nuevo no ha sido registrado, al no cumplir con la obligatoriedad de registrar el CEE en obra nueva se asigna el CEE del edificio antiguo al nuevo, generando errores. Hay algunos errores catastrales en la fecha de construcción, que en lugar de modificar las variables de Año de reforma o rehabilitación y de Antigüedad efectiva en Catastro, que realiza un valor medio entre la fecha original de construcción y la de reforma a efectos del cálculo del del valor catastral. Esto genera errores en la correcta clasificación del edificio, el total de casos anómalos suma 6.805 edificios, esto en el total del modelo no resulta relevante, pero pone de manifiesto la necesidad de mejorar la calidad de los datos y una posible utilidad del modelo para detectar casos anómalos e informar a las fuentes de información para su posterior corrección.

Como se comentaba en el indicador ‘6.1.12. Número de certificados de eficiencia energética: por clase de eficiencia energética’ de la EPBD, es importante no solo estudiar el número de CEE por clase, sino además cómo es la distribución de los edificios certificados para conocer su representatividad.

La tabla 48 muestra que existe una desproporción entre los porcentajes de CEE y las tipologías que representan. Los edificios más recientes, con mejores calificaciones energéticas están más certificados que los edificios anteriores al 2012, cuando no existía la obligatoriedad de hacerlo al construir un edificio. Resulta notable la falta de edificios registrados respecto a los totales en las fechas posteriores a 2012, esto puede deberse a varias causas: todavía hay CCAA que no ofrecen sus datos en abierto y algunas todavía no los ofrecen de forma completa, sino que continúan en proceso de desarrollo. Y probablemente, que la obligatoriedad de registrarlos no se efectúa de forma general por los técnicos, sino que se incorpora en los expedientes de licencia y no se registra en la base de datos de la CCAA correspondiente, lo que destaca la necesidad de insistir en este proceso y en su obligatoriedad, ya que los datos muestran que no se está cumpliendo.

Tabla 48. Proporción de edificios certificados frente al total de edificios del periodo de construcción. Elaboración propia.

Período de construcción	Número de edificios certificados	Número de edificios	Porcentaje de edificios certificados
<1940	200.898	3.034.830	6,6
1941-1960	138.172	1.263.877	10,9
1961-1980	416.614	2.257.266	18,5
1981-2007	563.437	3.549.008	15,9
2008-2013	72.062	433.356	16,6
2014-2017	12.665	92.191	13,7
2018-2019	10.086	45.801	22,0
2020-2024	24.471	89.128	27,5
Total	1.438.405	10.765.457	13,4

6.3. Aplicaciones del modelo a escala urbana. El caso de estudio de Zaragoza

Además del análisis de las características del parque edificado a escala nacional, estos modelos tienen diferentes aplicaciones como es su uso a escala urbana, permitiendo un análisis que genera datos para fomentar las intervenciones y estrategias a escala municipal.

Este modelo permite analizar el comportamiento de los edificios, ver sus características principales y su relación con el consumo de energía primaria no renovable y sus emisiones de GEI. Dentro de sus múltiples potencialidades, este modelo al ser edificio a edificio permite identificar las zonas menos eficientes, y los edificios estadísticamente con un peor comportamiento energético, lo que consigue fomentar el desarrollo de políticas y medidas enfocados a ellos.

La figura 58 muestra el modelo generado a escala nacional y un zoom de la ciudad de Zaragoza con sus edificios clasificados por consumo de energía primaria no renovable.

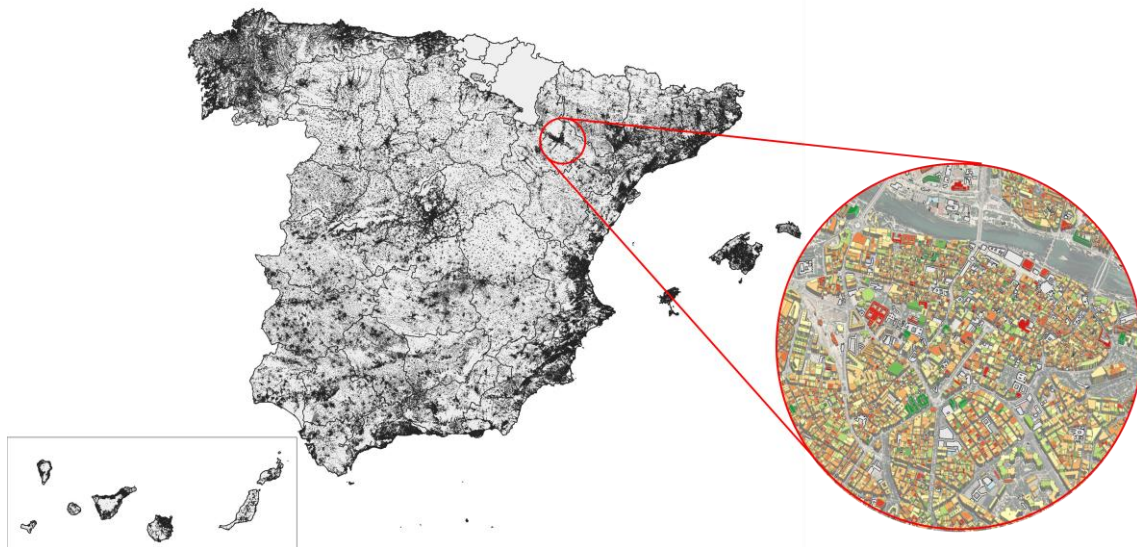


Figura 58. Modelo nacional desarrollado y vista de Zaragoza. Elaboración propia, publicada en [235].

El modelo abarca gran cantidad de información. En la figura 59 se observa como ejemplo la distribución del consumo de energía primaria no renovable por tipología de edificio y periodo de construcción en Zaragoza. Se han adaptado las clasificaciones para hacerlas más representativas del parque edificado zaragozano. En la figura se aprecia como los edificios más comunes, los que tienen mayor cantidad de puntos, son los de bloque mayor a 4 alturas construido antes de 1980. Y la curva muestra la distribución del CEPNR en cada tipología, indicando como todos los edificios manifiestan unos patrones análogos de mayor

eficiencia cuando más recientes son y un mayor consumo en general de las unifamiliares. El análisis permite identificar los edificios que corresponden a los puntos más a la derecha de la gráfica, los que poseen un mayor consumo energético, y poder estudiar sus necesidades y casuísticas específicas.

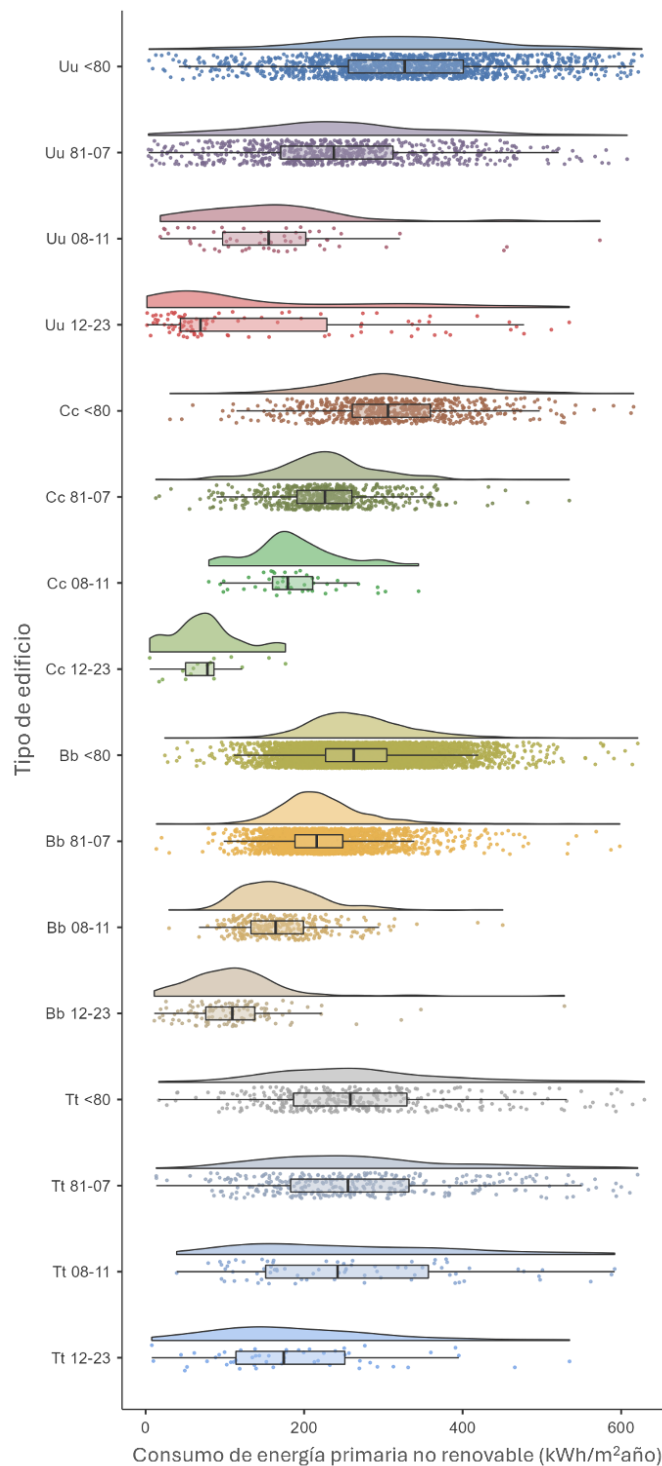


Figura 59. Distribución del consumo de energía primaria no renovable por tipología de edificio y periodo de construcción (Uu – Unifamiliar, Cc – Bloque de 3 o menos plantas, Bb – Bloque de 4 o más plantas, Tt – Edificio de uso no residencial). Elaboración propia, publicada en [235].

En forma de diagrama de cajas se exponen los valores del 25% y 75% más y menos eficientes, cada caja engloba el 50% de los datos y los bigotes, las líneas, se extienden dejando fuera de ellas el 5% extremo de los datos. Si las cajas son más estrechas implica un comportamiento muy homogéneo del parque edificado, sin apenas variación de la gran masa de edificio de ese clúster, mientras que unas cajas más alargadas implican que hay diferencias significativas en el CEPNR dentro de ese clúster y se debe analizar más en detalle o concretar sus características para poder estudiarlos de forma más precisa.

La línea negra en la caja representa la mediana (Q2), que corresponde al valor límite que separa el 50% de los edificios con mayor consumo energético del 50% con menor consumo. Una posición de la mediana cercana a la cara superior de la caja indica una mayor concentración de valores en la parte superior del rango intercuartílico. Esto sugiere que una gran parte de los edificios presenta consumos relativamente altos, mientras que una menor proporción tiene consumos más bajos dentro de este rango.

Al analizar en detalle los resultados, la Figura 60 muestra la distribución del consumo de energía primaria en los bloques de viviendas de cuatro o más plantas. Este consumo se ha clasificado según los rangos establecidos para las clases de eficiencia energética. Se observa que la gran mayoría de edificios se concentra en las clases E, F y G, lo que evidencia un bajo desempeño energético. En particular, los edificios anteriores a la entrada en vigor del CTE en 2008 se sitúan mayoritariamente en las clases más bajas, siendo necesarios procesos de rehabilitación. En contraste, las clases más altas y eficientes están representadas únicamente por puntos dispersos, correspondientes a rehabilitaciones energéticas ya realizadas, aunque estas siguen siendo casos aislados y lejos de constituir la norma en este tipo de bloques.

En los edificios construidos tras la aplicación progresiva de los distintos cambios normativos del CTE, se aprecia una mejora significativa de la eficiencia energética. Sin embargo, los levantados durante el periodo 2008-2011 se encuentran todavía en una situación intermedia, oscilando principalmente entre las clases D y E. Por su parte, los edificios construidos entre 2012 y 2023 alcanzan las categorías más eficientes, destacando especialmente los más recientes, que muestran una eficiencia muy superior.

Este desglose y su ubicación en el marco de las clases energéticas permiten dimensionar la magnitud de la intervención necesaria en el parque residencial existente, que requiere mejoras energéticas profundas y a gran escala. Además, esta clasificación ofrece una herramienta estratégica para identificar los puntos más ineficientes en el territorio, facilitando el diseño de análisis específicos sobre las barreras a la rehabilitación, así como la definición de medidas y estrategias para impulsar la mejora energética en los edificios con peor desempeño.

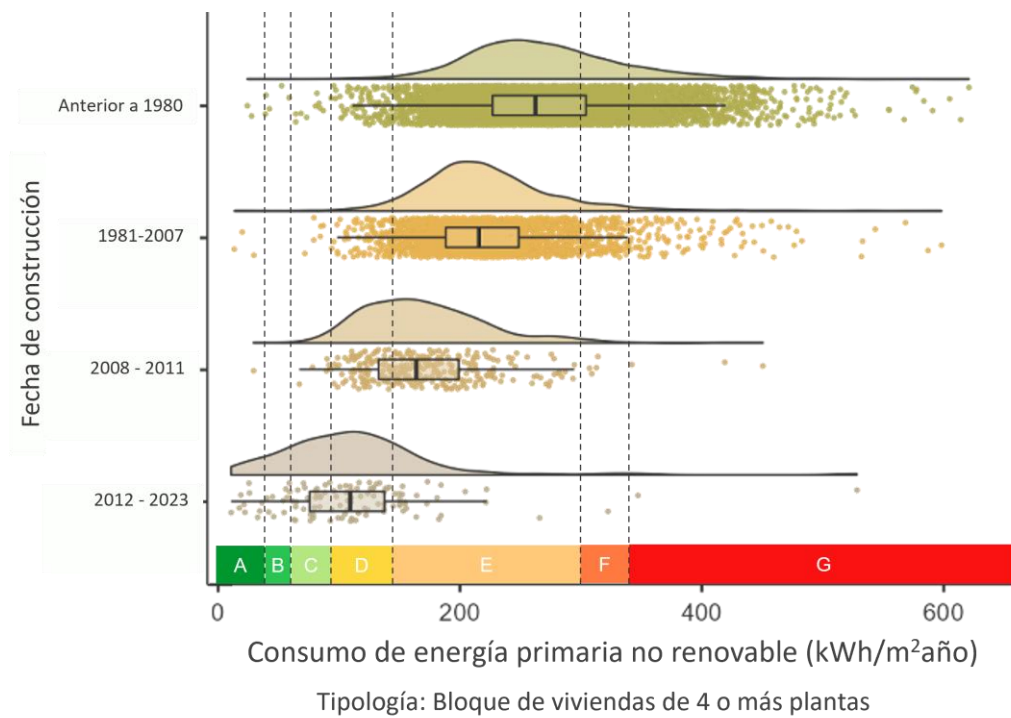


Figura 60. Distribución del consumo de energía primaria no renovable en bloques de 4 o más plantas en Zaragoza clasificadas por periodo de construcción. Elaboración propia, publicada en [235].

Conclusiones y futuras líneas de investigación

7. Conclusiones y futuras líneas de investigación

7.1. Conclusiones principales

Para una mayor comprensión se han organizado las conclusiones en bloques temáticos.

7.1.1 Principal avance científico

En el capítulo 2 de objetivos y metodología se definía el objetivo principal de esta tesis: definir la metodología para construir un modelo que amplíe y mejore la información y diagnóstico energético que se tiene del parque edificado español.

A continuación se describe cómo se ha cumplido este objetivo a través de la definición de sendas metodologías para la construcción de dos modelos energéticos a escala nacional.

Desarrollar metodologías para construir modelos a escala nacional ha sido un reto complejo y novedoso, pero esta tesis demuestra que es posible abordarlo con éxito y que el resultado es de alto interés para analizar el parque edificado y apoyar la toma de decisiones basadas en datos. Estas metodologías constituyen la primera propuesta de diseño de metodologías científicas que permiten generar modelos para analizar el progreso de la descarbonización aplicables de forma homogénea entre los países en la UE. Son metodologías en abierto y actualizables de forma automática, aspectos fundamentales para lograr mapear y analizar el parque edificado de forma continua.

Se ha desarrollado la metodología para generar dos modelos, en primer lugar, el UBEM basado en CEE y datos en abierto y, posteriormente, el modelo nUBEM, empleando Machine Learning para generar predicciones sobre el parque edificado residencial. Estos modelos son ambos los primeros en su tipo.

El UBEM basado en CEE es el tercer modelo a escala nacional en la literatura científica, y es el primer modelo UBEM a escala nacional creado a través de CEE, esto permite aligerar en gran medida los costes computacionales y los tiempos de cálculo, siendo el único que se genera con un ordenador estándar en lugar de supercomputadora.

El modelo nUBEM es el primero a escala nacional que aplica IA para aprender de los patrones de comportamiento energético de los edificios y realizar

predicciones. Este permite cubrir la totalidad del parque edificado residencial, generando información edificio a edificio en grandes escalas.

Además, la aproximación propuesta a través de CEE ha demostrado su superioridad a la aproximación por arquetipos por dos razones: los arquetipos dependen de lo representativos que éstos sean de sus tipologías y, además, incorporan únicamente los valores medios de los tipos de edificios, mientras que los modelos basados en CEE captan mejor la variabilidad interna de cada tipología, dando una visión más realista del comportamiento energético de los edificios.

Estos modelos contienen gran cantidad de información generando análisis a escala edificio a edificio que permiten aumentar el conocimiento actual que tenemos del parque edificado.

Conforme ha ido avanzando la tesis se han ido generando una serie de preguntas de investigación a las que ahora se puede contribuir con el conocimiento necesario para darles una respuesta.

Las preguntas formuladas han sido:

- ¿Cuál es el nivel de conocimiento actual que se tiene sobre los edificios?

En los últimos años el conocimiento sobre el parque edificado ha avanzado significativamente, y cada vez se dispone de más información sobre sus características físicas y energéticas. Asimismo, estos datos se están poniendo a disposición en acceso abierto con una frecuencia creciente, lo que facilita su análisis y aplicación en diversos ámbitos técnicos y científicos.

En el desarrollo de esta tesis se ha participado, junto con otros investigadores españoles, en un estudio centrado en los indicadores y la disponibilidad de datos en España para evaluar el avance en la descarbonización del parque dentro del proyecto de investigación LocalREGEN, cuyos resultados se resumen en el capítulo 3. Además, en este mismo capítulo, se identifican las principales directivas e iniciativas europeas orientadas a fomentar el acceso abierto a los datos, así como las fuentes de datos nacionales en abierto derivadas de dichas directivas

- ¿Es suficiente para dar respuesta a los indicadores de progreso que pide la Comisión Europea para el seguimiento de la descarbonización?

No. A través del estudio del proyecto LocalREGEN, en el que se ha participado, se ha comprobado que con los datos actuales únicamente el 17% de los indicadores son completamente desarrollables, el 41% parcialmente y el 42% no son desarrollables.

- ¿Los datos existentes tienen suficiente calidad?

No. El análisis de los datos existentes en el estudio de indicadores y su disponibilidad realizado en el proyecto LocalREGEN revela desafíos significativos, que se describen en el capítulo 3 de esta tesis, como la complejidad en el procesamiento de datos, la baja georreferenciación y frecuencias de actualización insuficientes. Además, esta tesis ha contribuido asimismo a comprender que, si bien la información existente es cada vez mayor y más accesible, aún existen desafíos como la fragmentación de los datos y la falta de una estrategia común de recopilación. Estas limitaciones muestran la necesidad de mejorar los datos para facilitar el desarrollo de indicadores relacionados con la descarbonización y la efectividad de las políticas de rehabilitación de edificios. En este contexto, la tesis contribuye de manera innovadora al unificar y analizar la información existente mediante modelos UBEM a escala nacional.

- ¿Cómo conocer más sobre el estado energético del parque edificado?

En esta investigación se propone como estrategia para avanzar en el conocimiento el uso de nuevas tecnologías que permitan aprovechar al máximo los datos disponibles. El uso de la automatización de procesos, los sistemas de información geográfica, las técnicas de Big Data y la inteligencia artificial han sido fundamentales para conseguir generar estos modelos UBEM a escala nacional empleando tiempo y recursos razonables. La combinación de datos físicos, geoespaciales y energéticos permite obtener un conocimiento más profundo y detallado del estado energético del parque edificado.

- ¿Qué nuevas herramientas pueden hacer posible avanzar en el conocimiento sobre el parque construido?

El uso de UBEM, la inteligencia artificial y la modelización geoespacial han demostrado ser herramientas clave para mejorar el conocimiento sobre el parque edificado. Además, la creciente disponibilidad de datos abiertos y el desarrollo de metodologías automatizadas facilitan análisis cada vez más precisos y accesibles.

- ¿Cómo construir un modelo a escala nacional y qué dificultades supone realizarlo?

Construir un modelo a escala nacional es un reto complejo. Hasta la realización de esta tesis, únicamente dos países lo habían abordado mediante una aproximación basada en edificios representativos. Este enfoque consiste en modelar de forma simplificada todos los edificios del país a través del uso de arquetipos y simular su comportamiento energético. Sin embargo, dicha

metodología implica elevadas demandas computacionales, lo que requiere el uso de infraestructuras informáticas de alto rendimiento.

Como hipótesis inicial, se planteó la posibilidad de emplear los CEE con el objetivo de reducir las exigencias computacionales, ofreciendo así una alternativa más eficiente para el desarrollo del modelo.

- ¿Se puede construir un UBEM a partir de CEE?

Sí, y los resultados obtenidos en esta tesis lo demuestran. A partir de los CEE disponibles, se ha logrado generar un modelo capaz de caracterizar el comportamiento energético del parque edificado, proporcionando una base sólida para la evaluación y el seguimiento de su rendimiento. Además de los CEE, se requiere la integración de múltiples fuentes de datos, el uso de metodologías eficientes de procesamiento y modelización, y la optimización de los recursos computacionales. Gracias a los avances tecnológicos y metodológicos, cada vez es más viable desarrollar modelos nacionales de energía urbana con un alto nivel de precisión y aplicabilidad.

- ¿Es la calidad de los resultados de este UBEM adecuada?

Los resultados obtenidos han sido validados y muestran una calidad suficiente para generar indicadores y análisis útiles a escala nacional. A pesar de la heterogeneidad de los datos de partida y la necesidad de realizar un intenso filtrado, los métodos empleados han permitido obtener un modelo robusto y aplicable a la planificación y evaluación de políticas energéticas. Para generar resultados más precisos, se han añadido varias características geoespaciales a los datos, empleando técnicas de GIS aplicadas al Big Data para conseguir realizar un tratamiento de la información geoespacial eficiente.

A partir de datos geoespaciales bidimensionales y datos alfanuméricos del catastro, la información obtenida se transforma mediante programación y se combina para obtener las características de los edificios, tales como ubicar su zona climática, obtener su compacidad, su superficie de medianeras y de fachada edificio a edificio, lo que mejora la precisión de los modelos.

- ¿Puede la IA predecir el comportamiento energético de los edificios de los que no se tienen datos?

Sí. En esta investigación se ha comprobado que la IA es capaz de estimar el comportamiento energético de los edificios con la información en abierto disponible. En particular, se ha comprobado que el algoritmo *XGBoost* es el más apto para este problema, ya que ha sido capaz de estimar el comportamiento energético de edificios de forma precisa. Mediante algoritmos de aprendizaje

automático, se ha probado que es posible inferir características energéticas a partir de datos físicos y geoespaciales, lo que amplía significativamente el conocimiento sobre el parque edificado al no existir datos energéticos sobre el 86,2% de los edificios residenciales.

- ¿Es la calidad de los resultados de este UBEM híbrido adecuada?

Sí. Los resultados obtenidos con el nUBEM han mostrado una buena capacidad predictiva, lo que valida la eficacia del enfoque. A medida que se integren más datos y se optimicen los modelos, su precisión y aplicabilidad seguirán mejorando.

- ¿Sirven estos datos para el desarrollo de indicadores de progreso?

Sí. En esta investigación se ha logrado calcular un número significativo de indicadores de forma automatizada, lo que facilita el seguimiento de la descarbonización del parque edificado. Estos datos representan un gran avance en la capacidad de evaluar el progreso hacia los objetivos europeos de eficiencia energética y reducción de emisiones. Si bien aún queda camino por recorrer en términos de metodologías comunes y disponibilidad de información, esta tesis demuestra que es posible avanzar significativamente en el cálculo de indicadores de progreso. Se han logrado obtener 69 indicadores, de ellos, 25 de manera completa, 24 de forma parcial y 20 son potencialmente calculables, un número muy significativo respecto de los 75 indicadores sobre características físicas y energéticas del parque edificado. Esto se ha logrado gracias a la automatización de los procesos del modelo, se facilita la obtención de una visión global y actualizada del parque edificado, lo que sin duda contribuye a mejorar el seguimiento de la descarbonización en línea con los objetivos de la Comisión Europea.

En conclusión, la tesis aporta un conjunto de metodologías innovadoras para avanzar en el conocimiento del parque edificado, mejorando la capacidad de respuesta a los indicadores de progreso de la rehabilitación y de la descarbonización del parque edificado. Los modelos realizados prueban que es posible realizarlos a escala nacional y que son capaces de mejorar la calidad y el aprovechamiento actual de los datos. A través del uso de modelos UBEM y herramientas de Big Data e Inteligencia Artificial, se han logrado superar muchas de las limitaciones actuales, permitiendo un análisis más completo y preciso de la eficiencia energética en edificios y abriendo la puerta a futuros modelos más avanzados que permitan aumentar todavía más el nivel de conocimiento alcanzado sobre el parque edificado.

7.1.2 Principal contribución a la sociedad: Avances en el conocimiento del parque edificado.

El desarrollo de la tesis ha permitido valorar la importancia de los datos en abierto y el uso de nuevas tecnologías para generar conocimiento.

La información sobre el parque edificado ha avanzado significativamente en los últimos años, y cada vez se dispone de más datos sobre sus características físicas y energéticas. Sin embargo, aún existen desafíos como la fragmentación de los datos y la falta de una estrategia común de recopilación.

En este contexto, la tesis contribuye de manera innovadora al unificar y analizar la información existente mediante modelos UBEM a escala nacional. Además, con la creciente disponibilidad de datos en abierto, las oportunidades para avanzar en el conocimiento y desarrollar análisis más detallados son cada vez mayores. A medida que más datos se abran y se estandaricen, la calidad seguirá mejorando, reforzando la fiabilidad de los modelos y de su análisis.

El uso de la automatización de procesos, los sistemas de información geográfica, las técnicas de Big Data y la inteligencia artificial han sido fundamentales para conseguir generar estos UBEM a escala nacional en tiempo y recursos razonables. La combinación de datos físicos, geoespaciales y energéticos en estos modelos permite obtener un conocimiento más profundo y detallado del estado energético del parque edificado.

La combinación de la información procedente de diversas fuentes posibilita la identificación de patrones y relaciones que, de otro modo, podrían pasar desapercibidos. Esto facilita la evaluación de cómo interactúan las características físicas, el contexto geográfico y el comportamiento energético. Además, el análisis integral de estas variables contribuye a la definición de políticas y medidas fundamentadas en datos.

Asimismo, permite conocer deficiencias y potencialidades en la información que se recopila de los edificios. Por ejemplo, a partir del modelo nUBEM se han podido conocer las variables más relevantes para el algoritmo y ver fuentes de información útiles, pero desconocidas, como es la variable de Calidad de la construcción del catastro, u otras donde resulta fundamental mejorar la recopilación de la información debido a su importancia, como es el caso de las variables Año de reforma o rehabilitación y Coste de la reforma o rehabilitación, que al no distinguir entre intervenciones energéticas y otras, no aporta su potencial de información valiosa.

Generar modelos a nivel de edificio y manejar grandes volúmenes de datos permiten superar las limitaciones de los indicadores de progreso de la EPBD, representando de forma más precisa las características del parque edificado español. Contribuyendo no sólo a obtener datos sobre 69 indicadores de progreso

de la EPBD, sino a caracterizar energéticamente el parque edificado nacional con una metodología innovadora, automática y eficiente.

De esta forma, al ser modelos edificio a edificio, se pueden realizar análisis específicos de CCAA, provincias o municipios, admitiendo enfocar el estudio donde sea necesario efectuarlo detallado y adaptado a cada contexto territorial.

7.2. Potenciales desarrollos de la investigación y Open Science

Difundir el trabajo de investigación es fundamental para maximizar su impacto en la sociedad. La ciencia en abierto, accesible de forma gratuita, facilita la difusión del conocimiento y potencia su uso. Publicar los resultados, el código generado y los datos empleados contribuye a la transparencia y a la reproducibilidad de los estudios, fomentando el avance científico. En esta tesis, se han publicado en acceso abierto un total de cinco artículos en revistas JCR, varios congresos y capítulos de libros, incorporando en abierto en ellos el código desarrollado para su uso y adaptación por otros investigadores.

7.2.1. Código y datos en abierto

El código desarrollado para generar los modelos ha sido publicado en repositorios en abierto, de forma que pueda ser empleado por otros usuarios o pueda servir de base para el desarrollo de futuras herramientas. Esto refuerza el compromiso con la *Open Science* y fomenta la colaboración en la comunidad científica.

El código del modelo basado en CEE y datos en abierto del capítulo 4 ha sido publicado en GitHub:

- Beltrán Velamazán, C.; Monzón Chavarriás, M.; López Mesa, B. *GitHub - NBEM: Code to Generate National-Scale Building Energy Models Based on Energy Performance Certificates*. Disponible en:
<https://github.com/CarlosBeltranVelamazan/NBEM>.

El código del modelo nUBEM del capítulo 5 ha sido publicado en los repositorios de Zenodo y GitHub:

- Beltrán Velamazán, C.; Monzón Chavarriás, M.; López Mesa, B. *nUBEM: National UBEM with Energy Performance Certificates and Artificial Intelligence (1.0.0)*. Zenodo 2025.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.14524563>.

- Beltrán Velamazán, C.; Monzón Chavarriás, M.; López Mesa, B. *GitHub - nUBEM: National UBEM with Energy Performance Certificates and Artificial Intelligence*. Disponible en: <https://github.com/CarlosBeltranVelamazan/nUBEM>.

7.2.2. Herramienta completa

Durante el desarrollo de la investigación, se ha trabajado en hacer más fáciles al público las herramientas generadas, de manera que su uso pueda ser lo más cómodo posible.

El código para generar las herramientas está automatizado y resulta accesible para un público formado en programación en Python. Para fomentar el uso de esta herramienta, se ha trabajado en la creación de una versión ejecutable a través de una interfaz que permita, mediante pestañas y opciones, seleccionar los pasos a realizar para generar el modelo sin necesidad de saber programar.

Para ello se ha creado una interfaz gráfica de usuario que permita, a través de las opciones que ofrece, generar los modelos. En la figura 61 se muestra una primera versión de la herramienta con la que obtener el modelo basado en CEE y datos en abierto del capítulo 4. La interfaz gráfica está disponible en <https://github.com/CarlosBeltranVelamazan/GUI-NBEM> siendo una primera versión funcional de la herramienta definitiva.

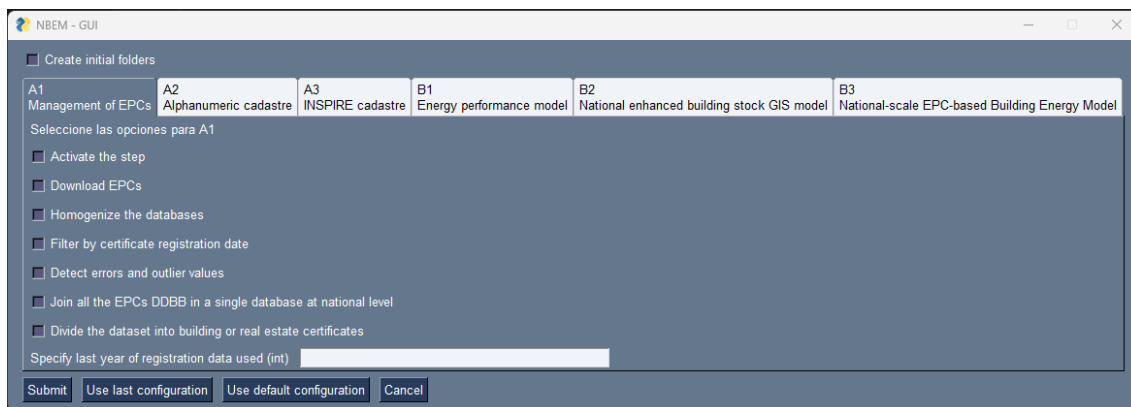


Figura 61. Interfaz gráfica de usuario de la herramienta para generar el modelo basado en CEE y datos en abierto. Elaboración propia.

La herramienta se encuentra en un estado preliminar, pero podría facilitar el acceso a estos modelos a los usuarios sin necesidad de saber programar. Cada pestaña contiene el correspondiente proceso de la metodología empleada y cada opción marca el paso a ejecutar, así como la posibilidad de utilizar la configuración recomendada para generar de forma directa y automática el modelo completo.

7.2.3. Mapa web

En el futuro, sería interesante desarrollar un mapa web interactivo que permita a los usuarios acceder a la información sobre el parque edificado sin necesidad de descargar herramientas ni generar modelos.

En la figura 62, se muestra una primera versión interactiva, mostrando el mapa de zonas climáticas generado en esta investigación. Se encuentra en fase preliminar, ya que todavía quedan aspectos pendientes de realizar, como optimizar la incorporación de los datos de los edificios en un mapa web antes de su publicación.

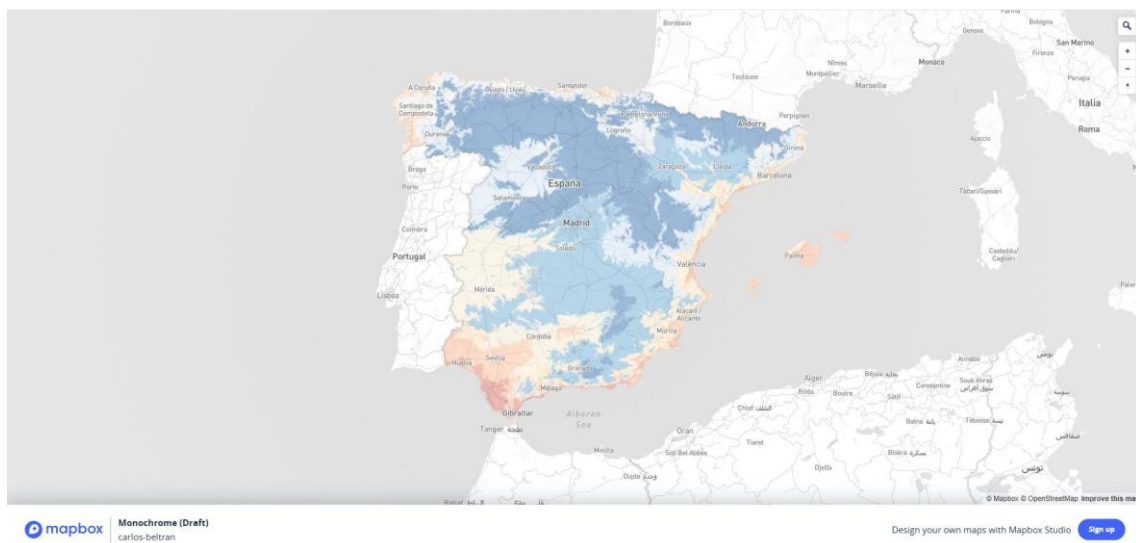


Figura 62. Versión inicial del mapa interactivo. Elaboración propia.

7.3. Limitaciones

Los modelos generados son útiles, si bien poseen una serie de limitaciones que deben tenerse en cuenta.

Los modelos dependen de la publicación actual de datos en abierto, tanto en cantidad como en calidad y en el formato en que están publicados. El hecho de que algunas CCAA no publiquen sus CEE en abierto representa una limitación en cuanto al alcance y la capacidad del modelo.

La validez de los modelos depende directamente de la calidad de los datos publicados, aunque los modelos incorporan sus propios sistemas de filtrado y de análisis de la información para descartar errores y datos anómalos.

Aun con esto, al trabajar en el campo del Big Data, es obligatorio considerar que siempre habrá errores en la información, ya que el uso masivo implica que nunca se podrá analizar dato a dato su veracidad, aun con esto, la presencia de

errores, principalmente en los CEE es elevada y supone una dificultad al depender la calidad de los modelos de la información publicada.

Este es un tema que la propia Comisión Europea ha abordado de forma directa, exigiendo a los países que comprueben que los CEE generados son precisos, aunque al menos en España todavía se está lejos del grado de precisión que solicita la UE.

Asimismo, la información ofrecida es muy dispar, por ejemplo, como se explica en el capítulo 6, al no aportar la mayoría de las CCAA datos sobre el consumo de energía primaria y final total, ni sobre la parte renovable o la relativa a las instalaciones, o el vector energético (variables internas del archivo XML que se adjunta junto con el CEE), existe un déficit de información que podría ser fácilmente resoluble, ya que hay otras CCAA que ofrecen directamente en abierto toda la información no protegida del certificado. Esta discrepancia de criterios genera una barrera en los datos que aminora el potencial de los modelos, el cual podría tener una validez mucho mayor si se dispusiera de ella.

La forma de aportar los datos es también una limitación, trabajar con distintos formatos y, sobre todo, criterios muy dispares, supone tener diferentes cantidades de información disponible en cada territorio y dificulta la generación de los modelos. Esta ausencia de datos es particularmente relevante en el caso de Navarra y País Vasco, al no formar parte del catastro español ni del catastro INSPIRE, ofrecidos por la Dirección General del Catastro, sino que tienen su propio catastro con sus propias particularidades de funcionamiento, lo que hace que no sea fácil integrarlos en el mismo modelo. Este es un aspecto que para el futuro podría resolverse, siendo la falta de estas CCAA la principal limitación del modelo en su estado actual.

Finalmente, la aportación del modelo del capítulo 5, al centrarse en edificios residenciales, tiene como limitación la actual falta de CEE en abierto con usos no residenciales. Como se trata de una categoría con necesidades energéticas y características muy dispares, según la utilización concreta que tenga, se hace necesario que exista una cantidad suficiente de CEE de cada uso para poder entrenar un algoritmo, que prediga con bastante precisión datos que, actualmente, no resultan suficientes para poder lograrlo.

7.4. Líneas de investigación futuras

Esta investigación ha dado lugar a múltiples líneas de investigación que se consideran interesantes para continuar su desarrollo en el futuro.

7.4.1. Escalabilidad del modelo

El tamaño del modelo nacional podría plantearse a nivel europeo: ¿es posible avanzar hacia un EU-BEM (*European Union Building Energy Model*)?

En la tesis se ha demostrado que, con los recientes avances en tecnologías, es posible generar modelos UBEM a escala nacional. Un futuro posible es la creación de modelos UBEM a escala supranacional, proponiéndose la elaboración de un EU-BEM, un UBEM de toda la Unión Europea.

Esto permitiría analizar el progreso de la descarbonización a escala supranacional, facilitar el intercambio de datos entre diferentes países y evaluar la efectividad de diversas estrategias y políticas de rehabilitación energética dentro del marco comunitario.

Y, además, se podrían:

- Evaluar distintas políticas y tecnologías para reducir el consumo energético y las emisiones de los edificios.
- Obtener indicadores de progreso en diferentes EM mediante un método consistente y con unos procedimientos uniformes.
- Recopilar información a gran escala para respaldar la toma de decisiones basada en datos.
- Desarrollar estrategias para alcanzar los objetivos climáticos.
- Evaluar y comparar el desempeño de distintas políticas y estrategias de rehabilitación.
- Analizar cómo, dependiendo de los escenarios considerados, algunas políticas de rehabilitación han tenido mayor éxito que otras.
- Incrementar la cantidad de datos disponibles para mejorar la comprensión del algoritmo sobre los patrones que definen el comportamiento energético.

Para hacer realidad el modelo EU-BEM, es necesario abordar varios desafíos, principalmente relacionados con la disponibilidad, el procesamiento, la privacidad y la estandarización de los datos. Aunque es posible procesar los datos catastrales de edificios INSPIRE en toda Europa, todavía se requiere un examen más exhaustivo y la estandarización de los datos específicos de cada país.

Además, la integración de fuentes de información con gran cantidad de datos sobre los edificios como el BIM, los Gemelos Digitales (*Digital Twins*) y el DBL

representa un avance significativo tanto en precisión como en alcance [177]. Estas tecnologías proporcionarían acceso a información detallada sobre características relacionadas con la energía, mejorando sustancialmente las capacidades predictivas del modelo nUBEM del capítulo 5. Asimismo, estas tecnologías abordan las brechas actuales asociadas con la falta de datos, ofreciendo una base más sólida para evaluar el comportamiento energético del parque edificado.

7.4.2. Hacia un catastro energético

Una línea futura de trabajo podría apoyar los avances hacia la creación de un catastro energético, una base de datos estructurada y georreferenciada que proporcione información detallada sobre el rendimiento energético de los edificios y su impacto ambiental.

Actualmente, la disponibilidad de datos energéticos está fragmentada y presenta desafíos de acceso, actualización y armonización. Sin embargo, con la metodología desarrollada en esta tesis, es posible generar información homogénea y comparable a gran escala, integrando diferentes fuentes de datos en un modelo unificado. Esta idea ha sido planteada parcialmente por Jiménez Solana [220], como un servicio que potenciaría la capacidad de dar información del catastro. Realizando algunos avances en los modelos, se podría apoyar la creación de un catastro energético que facilite la difusión de la información energética.

Esto serviría para evaluar los indicadores de progreso, obtener datos para políticas y medidas de rehabilitación y, por ejemplo, enfocarlas a zonas o edificios con mayores necesidades de intervención. Pero también serviría de punto de acceso al ciudadano para conocer el estado energético de su edificio, así como una herramienta de difusión del conocimiento para fomentar la realización de mejoras o un alquiler o compra con un conocimiento energético de su estado.

Este catastro energético serviría a investigadores como base de datos para poder realizar mayores y mejores análisis del parque edificado.

Además, la combinación de datos energéticos junto con una recopilación más detallada de la información sobre las reformas y rehabilitaciones permitiría conocer si se trata de una rehabilitación energética, el coste que ha implicado (dato actualmente publicado, pero sin definir el tipo de intervención) y el impacto en ahorro que ha supuesto en energía y emisiones de GEI.

Esto combinado y ofrecido desde una única fuente de información pública y en abierto sería de gran utilidad para medir el progreso de la descarbonización en España y Europa.

7.4.3. Hacia un catastro solar

A partir de los modelos desarrollados en los capítulos 4 y 5, cabe la posibilidad de plantear integrar la producción de energía renovable en los mismos, creando una herramienta para fomentar el autoconsumo y las comunidades energéticas.

Los modelos generados, al funcionar agregando diferentes tipos de datos, permiten la incorporación de aspectos sobre la producción de energía renovable. A través de los MDT que ofrece el CNIG [179] es posible obtener de forma automatizada el potencial fotovoltaico de las cubiertas de los edificios y combinarlo con los modelos. Actualmente, se han estudiado diferentes aproximaciones para obtener tanto modelos 3D [223] como 2D [241] de las ciudades para el cálculo del acceso solar de las cubiertas. Como se estudia en [241], los modelos 2D generan valores sobre el acceso solar de los edificios con buena precisión, en un tiempo y con un consumo de recursos mucho menores, siendo óptimos para el cálculo del potencial fotovoltaico de grandes áreas.

Por lo que es factible en el futuro combinarlo con los modelos realizados en esta tesis sobre el consumo de energía para fomentar el autoconsumo y encontrar puntos con mayor potencial para su desarrollo.

Combinar la información del CEPNR y las emisiones de GEI con el potencial de producción de energía solar es una línea de futuro que permitirá generar herramientas para fomentar el autoconsumo de energía. Al tener los modelos gran cantidad de información, se podrán poner en relación las cubiertas particularmente aptas para la producción de energía con pequeños consumidores de energía en su entorno (viviendas, oficinas, etc.) fomentando la generación de comunidades energéticas sostenibles.

Si a través del catastro se centralizase, esta información permitiría generar un catastro solar que ofreciese datos en abierto y fácilmente accesibles sobre el potencial de producción de energía solar. Esto combinado con la propuesta anterior de un catastro energético permitiría poner en relación el potencial de producción de energía renovable con el consumo del edificio de una forma clara y accesible. Esta fuente de información energética, pública y a escala nacional, proporcionaría acceso a los datos, facilitaría la toma de decisiones y fomentaría el progreso hacia la descarbonización del parque edificado.

En definitiva, los modelos desarrollados en esta tesis representan un avance significativo en la evaluación del progreso de la rehabilitación y la descarbonización del parque edificado nacional. Son modelos automatizados, actualizables y generados de manera eficiente en términos de tiempo y recursos, que permiten tomar decisiones fundamentadas a partir de datos. Además, las líneas de futuro propuestas, que facilitarían el acceso a la información tanto para ciudadanos como para administraciones, abren la puerta a una expansión del

potencial de estos modelos. La integración de herramientas para evaluar la producción de energía solar amplía aún más sus capacidades, contribuyendo no solo al seguimiento de la descarbonización, sino también al conocimiento profundo de los edificios que componen nuestro parque edificado. Estos avances son un paso clave para impulsar el progreso hacia un entorno construido más sostenible, evaluar el impacto de nuestros edificios y mejorar nuestra comprensión y gestión del parque edificado en su conjunto.

Conclusions and Future Research

7. Conclusions and Future Research

7.1. Main Conclusions

For greater clarity, the conclusions have been organized into thematic blocks.

7.1.1 Key Scientific Contribution

In Chapter 2, which addresses objectives and methodology, the main objective of this thesis was defined as establishing a methodology to construct a model that expands and enhances the available energy information and diagnostics of the Spanish building stock. The following describes how this objective has been achieved through the definition of two methodologies for constructing national-scale energy models.

Developing methodologies to build national-scale models has been a complex and novel challenge. However, this thesis demonstrates that it is feasible to address this challenge successfully, producing results of high interest for analysing the building stock and supporting data-driven decision-making. These methodologies represent the first scientific approach to designing frameworks that enable the creation of models for assessing decarbonization progress in a standardized manner across EU countries. They are open-access and automatically updatable methodologies, which are essential features for continuously mapping and analysing the building stock.

A methodology has been developed to generate two models: first, the Urban Building Energy Model (UBEM) based on Energy Performance Certificates (EPCs) and open data; and subsequently, the ‘national Urban Building Energy Model’, so called nUBEM, which employs Machine Learning (ML) to predict the energy performance of the residential building stock. Both models are the first of their kind.

The EPC-based UBEM is the third national-scale model in scientific literature and the first UBEM at the national scale created through EPCs. This approach significantly reduces the model’s computational costs and processing times, making it the only model generated using a standard computer instead of a supercomputer.

The nUBEM model is the first national-scale model to apply Artificial Intelligence (AI) to learn from buildings’ energy performance patterns and make predictions. This model covers the entire residential building stock, generating building-by-building information at large scales.

Moreover, the proposed approach using EPCs has demonstrated its superiority over the archetype-based approach for two reasons: archetypes rely on how representative they are of their typologies and only incorporate average values of building types. In contrast, EPC-based models better capture the internal variability of each typology, providing a more realistic view of buildings' energy performance.

These models contain a large amount of information, enabling building-by-building analyses that enhance our current understanding of the building stock.

As the thesis progressed, several research questions emerged, this work now contributes the necessary knowledge to provide informed answers.

The formulated research questions were:

- What is the current level of knowledge about buildings?

Knowledge of the building stock has significantly advanced in recent years, with increasing information available on its physical and energy characteristics. Moreover, this data is increasingly being made available as open access, facilitating its analysis and application in various technical and scientific fields.

During this thesis, collaboration with other researchers contributed to a study focused on indicators and data availability in Spain to assess the progress of building stock decarbonization within the LocalREGEN research project. The results of this study are summarized in Chapter 3. Additionally, this chapter identifies the main European directives and initiatives aimed at promoting open data access, as well as national open data sources derived from these directives.

- Is this information sufficient to address the progress indicators required by the European Commission for monitoring decarbonization?

No. Through the LocalREGEN project, in which this thesis participated, it was found that, with the current data, only 17% of the indicators are fully feasible, 41% are partially feasible, and 42% are not feasible.

- Are the data of sufficient quality?

No. The analysis of existing data in the study of indicators and data availability conducted within the LocalREGEN project reveals significant challenges, as described in Chapter 3. These challenges include data processing complexity, low georeferencing, and insufficient update frequencies. Additionally, this thesis has contributed to understanding that, while the availability and accessibility of existing information are increasing, challenges such as data fragmentation and the lack of a common data collection strategy

persist. These limitations highlight the need to improve data quality to facilitate the development of decarbonization-related indicators and enhance the effectiveness of building renovation policies. In this context, the thesis offers an innovative contribution by unifying and analysing existing information through national-scale UBEM models.

- How can we gain deeper insights into the energy performance of the building stock?

This research proposes the use of new technologies as a strategy to advance knowledge by maximizing the utility of available data. The use of process automation, Geographic Information Systems (GIS), Big Data techniques, and AI has been crucial in generating national-scale UBEM models within reasonable timeframes and limited resources. Combining physical, geospatial, and energy data enables a deeper and more detailed understanding of the energy performance of the building stock.

- What new tools can advance our understanding of the built environment?

The use of UBEM, AI, and geospatial modelling has proven to be key tools in enhancing our understanding of the built environment. This progress is further supported by the growing availability of open data and the development of automated methodologies that enable increasingly precise and accessible analyses.

- How can a national-scale model be constructed and what challenges does it involve?

Constructing a model at a national scale represents a complex challenge. Prior to this thesis, only two countries had approached this task using a method based on representative buildings. This method involves simplifying the modelling of all buildings in the country through archetypes and simulating their energy performance. However, this approach requires significant computational resources, necessitating the use of high-performance computing infrastructures. As an initial hypothesis, the possibility of employing EPCs was proposed to reduce these computational demands, offering a more efficient alternative for model development.

- Can UBEM be built using EPC data?

Yes, as demonstrated by the results obtained in this thesis. By leveraging the available EPC data, a model has been successfully generated that characterizes the energy performance of the building stock, thereby providing a robust foundation for evaluating and monitoring its performance. Beyond the EPC, it is essential to integrate multiple data sources, employ efficient processing and modelling methodologies, and optimize computational resources. Technological and methodological advancements have increasingly made it feasible to develop national urban energy models with a high degree of precision and applicability.

- Is the quality of the UBEM results adequate?

The validated results exhibit a quality sufficient to generate useful indicators and analyses on a national level. Despite the heterogeneity of the initial data and the need for intensive filtering, the employed methods have yielded a robust model applicable to the planning and evaluation of energy policies. To achieve more precise outcomes, several geospatial characteristics were incorporated into the dataset by applying GIS techniques to Big Data, thus ensuring efficient processing of geospatial information.

By transforming bidimensional geospatial data and alphanumeric cadastral data through programming, the model derives building characteristics. These include identifying climatic zones, determining compactness, and measuring party wall and facade surfaces on a building-by-building basis, all of which significantly enhance the model's precision.

- Can artificial intelligence predict the energy performance of buildings for which data is lacking?

Yes. This research has demonstrated that artificial intelligence can effectively estimate the energy performance of buildings using available open data. In particular, the XGBoost algorithm proved to be the most suitable for this problem, accurately predicting building energy performance. Machine learning algorithms have shown that it is possible to infer energy characteristics from physical and geospatial data, thereby significantly expanding our understanding of the building stock, especially considering that energy data is unavailable for 86.2% of residential buildings.

- Is the quality of the results from this hybrid UBEM adequate?

Yes. The outcomes obtained with the nUBEM have demonstrated strong predictive capabilities, validating the effectiveness of the approach. As additional data is integrated and the models are further optimized, both their precision and applicability are expected to improve.

- Are these data useful for developing progress indicators?

Yes. This research has successfully automated the calculation of a significant number of indicators, facilitating the monitoring of the decarbonization of the building stock. These data represent a substantial advancement in assessing progress toward European targets for energy efficiency and emission reductions. Although further work remains regarding standardized methodologies and data availability, this thesis demonstrates significant progress in the calculation of progress indicators. A total of 69 indicators were obtained, 25 completely, 24 partially, and 20 potentially calculable, representing a substantial proportion relative to the 75 indicators covering the physical and energy characteristics of the building stock. This achievement, enabled by the automation of model processes, provides a comprehensive and up-to-date overview of the built environment, thereby enhancing the monitoring of decarbonization in line with European Commission objectives.

In conclusion, this thesis introduces a suite of innovative methodologies that advance our understanding of the building stock and enhance the capacity to collect progress indicators for the renovation and decarbonization of the built environment. The developed models demonstrate that it is feasible to implement national-scale models that improve both the quality and the applicability of current data. By employing UBEM models alongside Big Data and AI tools, many of the current limitations have been overcome, enabling a more comprehensive and precise analysis of building energy efficiency and paving the way for future, more advanced models that will further deepen our understanding of the building stock.

7.1.2 Main Contribution to Society: Advances in the Understanding of the Built Environment

The development of this thesis has underscored the importance of open data and the adoption of new technologies for knowledge generation.

In recent years, information on the built environment has advanced significantly, with increasingly more data available on its physical and energy characteristics. However, challenges persist, such as data fragmentation and the absence of a unified data collection strategy.

Within this context, the thesis makes an innovative contribution by unifying and analyzing the existing information through national-scale UBEM models. Moreover, the growing availability of open data continuously enhances the opportunities to advance our understanding and develop more detailed analyses. As additional data are released and standardized, the quality of the

models and their analyses will further improve, thereby reinforcing their reliability.

The use of process automation, GIS, Big Data techniques, and AI has been fundamental to generating these national-scale UBEM models within reasonable time frames and resource constraints. By integrating physical, geospatial, and energy data, these models enable a more profound and detailed understanding of the energy status of the built environment.

Combining information from various sources facilitates the identification of patterns and relationships that might otherwise remain undetected. This integration supports the evaluation of interactions among physical characteristics, geographic context, and energy performance. Furthermore, a comprehensive analysis of these variables aids in defining data-driven policies and measures.

Additionally, this approach allows for the identification of deficiencies and opportunities in the data collected from buildings. For instance, the nUBEM model has revealed the most relevant variables for the algorithm and uncovered valuable information sources that were previously overlooked, such as the variable related to construction quality in the cadastre. It has also highlighted the need to improve data collection for critical variables, such as the year of renovation or refurbishment and the cost of renovation or refurbishment. Without differentiating between energy-related and non-energy-related interventions, these variables do not fully capture their potential value.

Developing building-level models and managing large volumes of data overcome the limitations of the EPBD progress indicators by more precisely representing the characteristics of the Spanish building stock. This approach not only contributes to obtaining data on 69 EPBD progress indicators but also enables the energetic characterization of the national building stock through an innovative, automated, and efficient methodology.

Furthermore, since these are building-by-building models, they allow for specific analyses at the level of autonomous communities, provinces, or municipalities, thereby facilitating detailed, context-specific studies.

7.2. Potential Developments of the Research and Open Science

The dissemination of research is essential to maximize its impact on society. Open science, which is freely accessible, facilitates the dissemination and utilization of knowledge. Publishing the results, the generated code, and the data used enhances transparency and reproducibility, thereby promoting scientific

advancement. In this thesis, a total of five open-access articles have been published in JCR journals, along with several conference papers and book chapters, in which the developed code has been made available for use and adaptation by other researchers.

7.2.1. Open Code and Data

The code developed to generate the models has been published in open repositories so that it may be employed by other users or serve as a foundation for the development of future tools. This commitment to Open Science fosters collaboration within the scientific community.

The code for the EPC-based UBEM presented in Chapter 4 has been published on GitHub:

- Beltrán Velamazán, C.; Monzón Chavarriás, M.; López Mesa, B. *GitHub - NBEM: Code to Generate National-Scale Building Energy Models Based on Energy Performance Certificates*. Available in: <https://github.com/CarlosBeltranVelamazan/NBEM>.

The code for the nUBEM presented in Chapter 5 has been published in the Zenodo and GitHub repositories:

- Beltrán Velamazán, C.; Monzón Chavarriás, M.; López Mesa, B. *nUBEM: National UBEM with Energy Performance Certificates and Artificial Intelligence (1.0.0)*. Zenodo 2025. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14524563>.
- Beltrán Velamazán, C.; Monzón Chavarriás, M.; López Mesa, B. *GitHub - nUBEM: National UBEM with Energy Performance Certificates and Artificial Intelligence*. Available in: <https://github.com/CarlosBeltranVelamazan/nUBEM>.

7.2.2. Complete Tool

During the research development, efforts have been made to enhance the accessibility of the generated tools to the public, ensuring their use is as straightforward as possible.

The code to generate the tools is fully automated and accessible to an audience with a background in Python programming. To encourage broader adoption of this tool, work has been conducted to create an executable version through an interface that allows users to select the necessary steps to generate the model via tabs and options, without requiring programming knowledge.

To achieve this, a Graphical User Interface (GUI) has been developed, providing options to generate the models seamlessly. Figure 61 presents an initial version of the tool used to obtain the EPC-based model described in Chapter 4. The graphical interface is available at <https://github.com/CarlosBeltranVelamazan/GUI-NBEM>, representing a first functional version of the final tool.

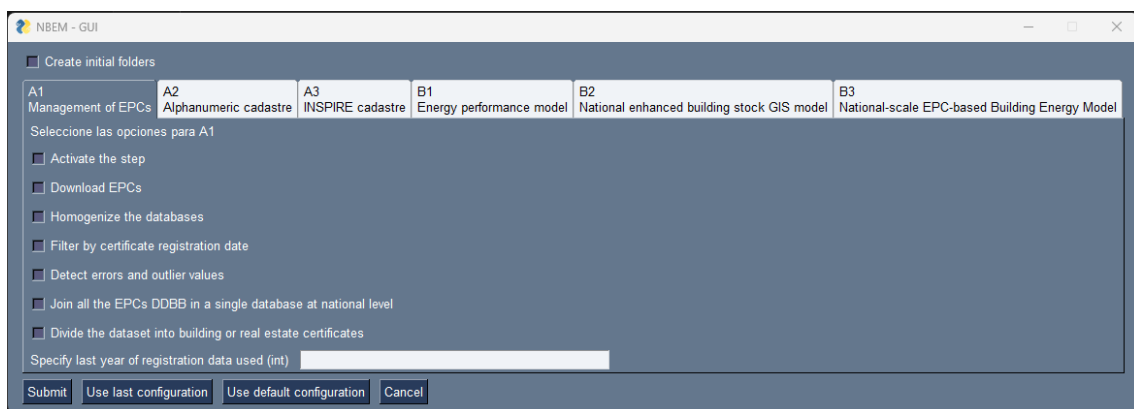


Figure 61. Graphical User Interface of the tool for generating the EPC-based model.
Own elaboration.

The tool is currently in a preliminary state but has the potential to facilitate access to these models for users without programming knowledge. Each tab contains the corresponding process of the employed methodology, and each option indicates the step to execute, offering the possibility to use the recommended configuration to automatically and directly generate the complete model.

7.2.3. Web Map

In the future, developing an interactive web map would be an interesting approach to allow users to access information about building stock without needing to download tools or generate models.

Figure 62 presents an initial interactive version, currently under development, displaying the climate zones map generated in this research. It remains in a preliminary phase, as certain tasks are still pending, such as optimizing the integration of building data into a web map before its public release.

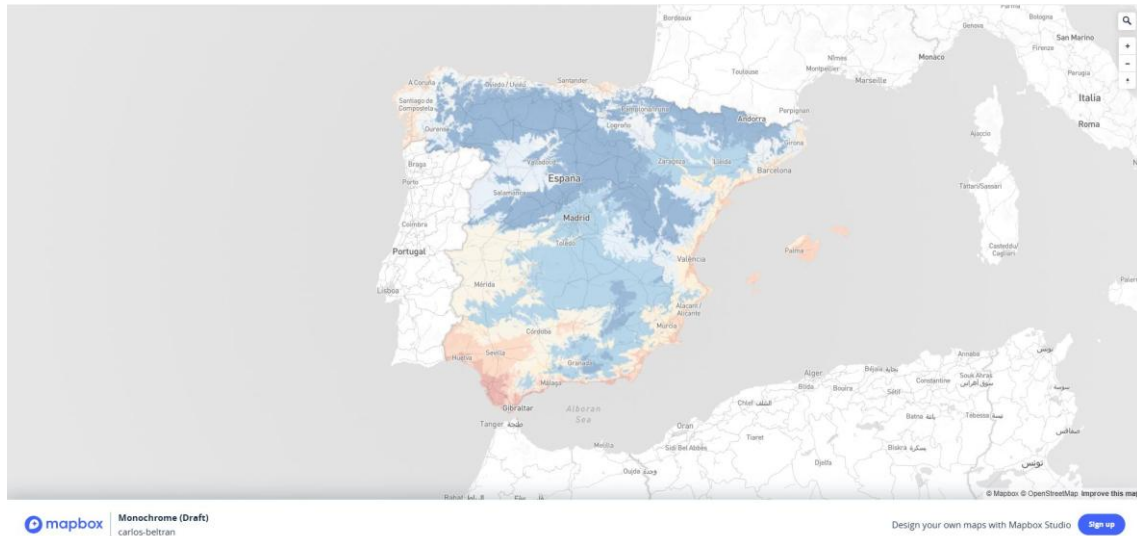


Figure 62. Initial version of the interactive map. Own elaboration.

7.3. Limitations

The generated models are useful, although they present certain limitations that must be considered.

The models rely on the current availability of open data, both in terms of quantity and quality, as well as the format in which the data are published. The fact that some Autonomous Communities do not publish EPCs openly limits the model's scope and capability.

The validity of the models depends directly on the quality of the published data, although the models incorporate their own filtering and information analysis systems to discard errors and anomalous data.

When working in the field of Big Data, it is crucial to acknowledge that errors in the information are inevitable, as large-scale data usage makes it impossible to verify the accuracy of each individual datum. Despite these measures, the presence of errors, particularly in the EPCs, is significant and poses a challenge, as the quality of the models depends on the published information.

This issue has been directly addressed by the European Commission, which requires countries to ensure that the generated EPCs are accurate. However, at least in Spain, the current level of accuracy still falls short of the expectations set by the EU.

Additionally, the information provided varies greatly. For example, as explained in Chapter 6, most CCAA do not provide data on total primary and final energy consumption, renewable energy contribution, installation-related information, or the energy vector (internal variables of the XML file attached to

the EPC). This lack of information could be easily addressed, as some CCAA do openly provide all non-protected information from the certificate. Such discrepancies in criteria create a data barrier that diminishes the potential of the models, which could be significantly enhanced if this information were consistently available.

The data format also represents a limitation. Working with different formats and, above all, very disparate criteria results in varying amounts of available information across regions and complicates the generation of models. This data gap is particularly relevant in the cases of Navarra and the Basque Country, as they do not belong to the Spanish cadastre or the INSPIRE cadastre provided by the Directorate General for Cadastre. Instead, they have their own cadastre with specific operational particularities, making integration into the same model challenging. This is an aspect that could be resolved in the future, as the absence of these CCAA is the primary limitation of the current model.

Finally, the contribution of the model from Chapter 5, focusing on residential buildings, is limited by the current lack of open non-residential EPCs. Since this category encompasses highly diverse energy needs and characteristics depending on the specific use, it is essential to have a sufficient quantity of EPCs for each use type to train an algorithm that can accurately predict data that are currently insufficient to achieve this goal.

7.4. Future Research Lines

This research has opened multiple promising research lines that are considered valuable for further development in the future.

7.4.1. Model Scalability

The size of the national model could be extended to a European scale: Is it possible to move towards an EU-BEM (European Union Building Energy Model)?

This thesis has demonstrated that, with recent technological advances, it is possible to generate UBEMs at a national scale. A potential future direction involves the creation of UBEMs at a supranational level, proposing the development of an EU-BEM, a UBEM covering the entire European Union.

This would enable the analysis of decarbonization progress at a supranational scale, facilitate data exchange between different countries, and assess the effectiveness of various energy retrofit strategies and policies within the European framework.

Additionally, it would allow for:

- Evaluating different policies and technologies to reduce buildings' energy consumption and emissions.
- Obtaining progress indicators for different Member States (MS) through a consistent method and uniform procedures.
- Gathering large-scale information to support data-driven decision-making.
- Developing strategies to meet climate targets.
- Assessing and comparing the performance of different policies and retrofit strategies.
- Analysing how, depending on the scenarios considered, some retrofit policies have been more successful than others.
- Increasing the amount of available data to improve the algorithm's understanding of patterns that define energy performance.

To make the EU-BEM model a reality, several challenges need to be addressed, primarily related to data availability, processing, privacy, and standardization. While it is possible to process INSPIRE building cadastral data across Europe, a more thorough examination and standardization of country-specific data are still required.

Furthermore, integrating information sources with extensive building data, such as Building Information Modelling (BIM), Digital Twins, and the Digital Building Logbook (DBL), represents a significant advancement in both accuracy and scope [177]. These technologies would provide access to detailed information on energy-related characteristics, substantially enhancing the predictive capabilities of the nUBEM from Chapter 5. They also address current gaps associated with data scarcity, offering a stronger foundation for assessing the energy performance of the building stock.

7.4.2. Towards an Energy Cadastre

A potential future line of work could support advances towards the creation of an energy cadastre, a structured and georeferenced database that provides detailed information on the energy performance of buildings and their environmental impact.

Currently, the availability of energy data is fragmented, posing challenges in terms of access, updating, and harmonization. However, with the methodology developed in this thesis, it is possible to generate homogeneous and large-scale comparable information by integrating different data sources into a unified model. This idea has been partially proposed by Jiménez Solana [220], as a service

that would enhance the capacity of the cadastre to provide information. By advancing the models, it could be possible to support the creation of an energy cadastre that facilitates the dissemination of energy information.

This cadastre would enable the evaluation of progress indicators, provide data for policies and renovation measures, and, for instance, target areas or buildings with the main needs for intervention. Additionally, it would serve as a point of access for citizens to know the energy status of their buildings, as well as a knowledge dissemination tool to promote building improvements or to make more informed decisions when renting or purchasing properties with an awareness of their energy status.

For researchers, this energy cadastre would serve as a valuable database to conduct more extensive and detailed analyses of the building stock.

Moreover, combining energy data with a more detailed collection of information on building renovations and rehabilitations would enable a better understanding of whether an intervention was energy-related, the costs involved (a metric currently published but without specifying the type of intervention), and the impact in terms of energy savings and reductions in greenhouse gas emissions.

Providing all this information through a single, open-access public source would be highly beneficial for monitoring the progress of decarbonization in both Spain and Europe.

7.4.3. Towards a Solar Cadastre

Building upon the models developed in Chapters 4 and 5, there is potential to integrate renewable energy production into these models, creating a tool to promote self-consumption and energy communities.

The generated models, by integrating different types of data, enable the incorporation of aspects related to renewable energy production. Using the Digital Terrain Models (DTM) provided by the National Geographic Institute of Spain (CNIG) [179], it is possible to automatically assess the photovoltaic potential of building rooftops and integrate this data into the models. Currently, various approaches have been explored to generate both 3D [223] and 2D [241] models of cities for calculating rooftop solar access. As discussed in [241], 2D models provide accurate estimates of buildings' solar access with significantly lower time and resource consumption, making them ideal for assessing the photovoltaic potential of large areas.

Consequently, it is feasible in the future to combine these methods with the models developed in this thesis on energy consumption, in order to promote self-

consumption and identify areas with the greatest potential for renewable energy development.

Combining the information on NRPEC and greenhouse gas (GHG) emissions with the potential for solar energy production is a promising future direction that will enable the development of tools to promote energy self-consumption. Given the large amount of data available in the models, it will be possible to connect rooftops particularly suitable for energy production with small energy consumers in their vicinity (e.g., homes, offices), fostering the creation of sustainable energy communities.

If centralized through the cadastre, this information could contribute to the development of a solar cadastre that offers open and easily accessible data on solar energy production potential. Combined with the previous proposal for an energy cadastre, this approach would clearly and accessibly link renewable energy production potential with building energy consumption. Such a national-scale, public energy information source would provide broad data access, facilitate decision-making, and promote progress towards the decarbonization of the building stock.

Finally, the models developed in this thesis represent a significant step forward in assessing the progress of building renovation and decarbonization at the national level. These models are automated, updatable, and generated efficiently in terms of time and resources, enabling data-driven decision-making. Additionally, the proposed future directions, which would enhance information accessibility for both citizens and administrations, open the door to expanding the potential of these models. The integration of tools to assess solar energy production further extends their capabilities, contributing not only to monitoring decarbonization but also to gaining deeper insights into the buildings that make up our built environment.

These advancements are a key step towards promoting progress towards a more sustainable built environment, evaluating the impact of our buildings, and improving our understanding and management of the building stock.

Anexos

Anexos

Anexo A

A.1. Evolución de los marcos de indicadores de la EPBD

La tabla A.1. desglosa la evolución de los marcos de indicadores de progreso desde la Recomendación de la Comisión (UE) 2019/786, las propuestas de enmiendas de la EPBD de 2021 y 2023 y el texto final aprobado de la EPBD en 2024.

La tabla A.1. está disponible en versión digital en el repositorio de Zenodo: Beltrán Velamazán, C.; López Mesa, B.; Monzón Chavarrías, M. Anexo A de la tesis Metodología UBEM con datos en abierto e IA para el diagnóstico energético del parque edificado europeo: el caso de España, 1.0.0; *Zenodo*, 2025. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14975958>.

A.2. Indicadores solicitados en la EPBD de 2024 aportados en las LTRS nacionales

La tabla A.2. desglosa los indicadores solicitados en el texto refundido de la EPBD de 2024 e indica si las LTRS de los EM europeos aportan ese indicador o uno similar y el grado de definición alcanzado, si se define, se desarrolla y si se aportan hitos de progreso.

La tabla A.2. está disponible en versión digital en el repositorio de Zenodo: Beltrán Velamazán, C.; López Mesa, B.; Monzón Chavarrías, M. Anexo A de la tesis Metodología UBEM con datos en abierto e IA para el diagnóstico energético del parque edificado europeo: el caso de España, 1.0.0; *Zenodo*, 2025. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14975958>.

Anexo B

B.1 Indicadores de progreso de la EPBD de 2024

Listado de indicadores de progreso del texto refundido de la EPBD de 2024. La tabla corresponde marco de indicadores del anexo II de la Directiva (UE) 2024/1275 [63], el texto refundido de la Directiva EPBD en vigor. Se indican los dominios, si el indicador es obligatorio u opcional y en colores si corresponde a las temáticas de indicadores de características físicas (**verde**), características energéticas (**azul**), temáticas relacionadas con las características energéticas (**naranja**) u otras temáticas (negro).

Leyenda de colores:

- Indicadores de características físicas
- Indicadores de características energéticas
- Otras temáticas relacionadas con las características energéticas
- Otras temáticas

a) Visión general del parque inmobiliario nacional

Obligatorios

Número de edificios y superficie total (m²):

- por tipo de edificio (incluidos los edificios públicos y las viviendas sociales)
- por clase de eficiencia energética
- edificios de consumo de energía casi nulo
- edificios menos eficientes (incluida una definición)
- el 43 % de los edificios residenciales menos eficientes
- proporción prevista de edificios exentos con arreglo al artículo 9, apartado 6, letra b) [edificios utilizados como lugares de culto y para actividades religiosas]

Número de certificados de eficiencia energética:

- por tipo de edificio (incluidos los edificios públicos)
- por clase de eficiencia energética

Tasas de renovación anuales: número y superficie total (m²)

- por tipo de edificio
- edificios transformados en edificios de consumo de energía casi nulo o en edificios de cero emisiones
- por profundidad de renovación (renovación media ponderada)
- edificios públicos

Consumo anual de energía primaria y final (ktep):

- por tipo de edificio
- por uso final

Ahorro de energía (ktep):

- edificios residenciales
- edificios no residenciales
- edificios públicos

Uso medio de energía primaria en kWh/(m².a) para edificios residenciales

Cuota de energía renovable en el sector de la construcción (MWh instalados o GWh generados):

- para otros usos

Emisiones de gases de efecto invernadero operativas anuales (kg de CO₂eq/(m².a):

- por tipo de edificio

Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero operativas anuales (kg de CO₂eq/(m².a):

- por tipo de edificio

Barreras y deficiencias del mercado (descripción):

- incentivos divididos
- capacidad del sector de la construcción y la energía

Evaluación de las capacidades de los sectores de la construcción, la eficiencia energética y las energías renovables

Pobreza energética (definición):

- % de personas afectadas por la pobreza energética
- proporción de los ingresos familiares disponibles gastados en energía
- población que vive en una vivienda en condiciones inadecuadas (por ejemplo, cubiertas con goteras) o en condiciones de confort térmico inadecuadas

Factores de energía primaria:

- por vector energético
- factor de energía primaria no renovable
- factor de energía primaria renovable
- factor de energía primaria total

Definición de edificio de consumo de energía casi nulo para edificios nuevos y existentes

Nivel óptimo de rentabilidad de los requisitos mínimos de eficiencia energética para edificios nuevos y existentes

Opcionales

Número de edificios y superficie total (m²):

- por antigüedad del edificio
- por tamaño del edificio
- por zona climática
- demoliciones [número y superficie total (m²)]

Número de certificados de eficiencia energética:

- por período de construcción

Reducción de los costes energéticos (EUR) por hogar (media)

Consumo de energía primaria de un edificio que forme parte del 15 % de los edificios más eficientes desde el punto de vista energético (umbral de contribución sustancial) y de un edificio que forme parte del 30 % de los edificios más eficientes desde el punto de vista energético (umbral de «no causar un perjuicio significativo») del parque inmobiliario nacional, con arreglo al Reglamento Delegado (UE) 2021/2139

Cuota de las instalaciones de calefacción en el sector de la construcción por tipo de caldera/instalación de calefacción

Cuota de energía renovable en el sector de la construcción (MWh instalados o GWh generados):

- in situ
- fuera del emplazamiento

PCG a lo largo del ciclo de vida [kg de CO₂ eq/(m²)] en edificios nuevos:

- por tipo de edificio

Barreras y deficiencias del mercado (descripción):

- administrativas
- financieras
- técnicas
- de sensibilización
- otras

Número de:

- empresas de servicios energéticos
- empresas de construcción
- arquitectos e ingenieros

-
- trabajadores cualificados
 - ventanillas únicas
 - pymes en el sector de la construcción/renovación
 - comunidades de energías renovables e iniciativas de renovación dirigidas por los ciudadanos

Previsiones de mano de obra de la construcción:

- arquitectos/ingenieros/trabajadores cualificados en situación de jubilación
- arquitectos/ingenieros/trabajadores cualificados que acceden al mercado
- jóvenes en el sector
- mujeres en el sector

Visión general y predicción de la evolución de los precios de los materiales de construcción y de la evolución del mercado nacional

Visión general del marco jurídico y administrativo

b) Hoja de ruta para 2030, 2040 y 2050

Obligatorios

Objetivos en relación con las tasas de renovación anuales: número y superficie total (m²):

- por tipo de edificio
- edificios menos eficientes
- el 43 % de los edificios residenciales menos eficientes

Información con arreglo al artículo 9, apartado 1:

- criterios para eximir edificios no residenciales concretos
- porcentaje estimado de edificios no residenciales exentos
- estimación de las mejoras de la eficiencia energética equivalentes por los edificios no residenciales exentos

Objetivos en relación con el consumo anual previsto de energía primaria y final (ktep):

- por tipo de edificio
- por uso final

Ahorro de energía previsto:

- por tipo de edificio

Objetivos en relación con el aumento de la cuota de energías renovables de conformidad con el artículo 15 bis de la Directiva (UE) 2018/2001

Objetivos numéricos para la implantación de la energía solar en los edificios

Objetivos en relación con las emisiones de gases de efecto invernadero operativas previstas (kg de CO₂ eq/(m².a):

- por tipo de edificio

Objetivos en relación con la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero operativas previstas (%):

- por tipo de edificio

Beneficios de mayor alcance previstos:

- % de reducción de personas afectadas por la pobreza energética

Contribución de los Estados miembros a los objetivos de eficiencia energética de la Unión de conformidad con el artículo 4 de la Directiva (UE) 2023/1791 atribuible a su renovación de parque inmobiliario (cuota y valor en ktep)

Contribución de los Estados miembros a los objetivos de la Unión en materia de energías renovables de conformidad con la Directiva (UE) 2018/2001 atribuible a su renovación de parque inmobiliario (cuota, MWh instalados o GWh generados):

Opcionales

Objetivos en relación con la cuota prevista (%) de edificios renovados:

- por tipo de edificio
- por profundidad de renovación

Cuota de energía procedente de fuentes renovables en el sector de la construcción (MWh instalados o GWh generados):

Divididos entre las emisiones del capítulo III [instalaciones fijas] y el capítulo IV bis [nuevo comercio de derechos de emisión para edificios y transporte por carretera] de la Directiva 2003/87/CE, y otros contingentes;

Objetivos en relación con las emisiones de gases de efecto invernadero del ciclo de vida completo previstas (kg de CO₂ eq/(m².a) en edificios nuevos:

- por tipo de edificio

Beneficios de mayor alcance previstos:

- creación de nuevos empleos
- aumento del PIB (cuota y miles de millones de euros)

c) Visión general de las políticas y medidas puestas en ejecución y previstas

Obligatorios

Políticas y medidas en relación con los siguientes aspectos:

- a) la determinación de planteamientos rentables en materia de renovación para diferentes tipos de edificios y zonas climáticas, teniendo en cuenta los puntos de activación potenciales en el ciclo de vida de los edificios;
- b) las normas mínimas de eficiencia energética nacionales de conformidad con el artículo 9, y otras políticas y acciones dirigidas a los segmentos menos eficientes del parque inmobiliario nacional, incluidas las garantías a que se refiere el artículo 17, apartado 19;
- c) el fomento de la renovación en profundidad de los edificios, incluida la renovación en profundidad por etapas;
- d) la capacitación y la protección de los clientes vulnerables y la mitigación de la pobreza energética, incluidas políticas y medidas de conformidad con el artículo 24 de la Directiva (UE) 2023/1791, así como la asequibilidad de la vivienda;
- e) la creación de ventanillas únicas o mecanismos similares de conformidad con el artículo 18 para la prestación de asesoramiento y asistencia técnica, administrativa y financiera;
- f) la descarbonización de la calefacción y la refrigeración, inclusive a través de las redes urbanas de calefacción y refrigeración, y la eliminación gradual de los combustibles fósiles en la calefacción y la refrigeración, con vistas a una eliminación completa de las calderas de combustibles fósiles a más tardar en 2040;
- g) la prevención y el tratamiento de alta calidad de los residuos de la construcción y la demolición de conformidad con la Directiva 2008/98/CE, en particular en lo que respecta a la jerarquía de los residuos, y los objetivos de la economía circular;
- h) el fomento de las fuentes de energía renovables en los edificios en consonancia con el objetivo indicativo en relación con la cuota de energía procedente de fuentes renovables en el sector de la construcción establecido en el artículo 15 bis, apartado 1, de la Directiva (UE) 2018/2001;
- i) la implantación de instalaciones de energía solar en los edificios;
- j) la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero del ciclo de vida completo de los edificios en relación con su construcción, renovación, funcionamiento y el final de su vida útil, así como el recurso a las absorciones de carbono;

- k) el fomento de enfoques por distritos y barrios y de programas integrados de renovación por distritos, que pueden abordar asuntos como la energía, la movilidad, las infraestructuras verdes, el tratamiento de los residuos y del agua y otros aspectos urbanísticos y pueden tener en cuenta los recursos locales y regionales, la circularidad y la suficiencia;
- l) la mejora de los edificios propiedad de organismos públicos, incluidas políticas y medidas de conformidad con los artículos 5, 6 y 7 de la Directiva (UE) 2023/1791;
- m) la promoción de tecnologías inteligentes e infraestructuras para la movilidad sostenible en los edificios;
- n) la manera de abordar las barreras y las deficiencias del mercado;
- o) la manera de abordar la escasez de capacidades y de promover la educación, la formación específica, el perfeccionamiento profesional y el reciclaje profesional en los sectores de la construcción, la eficiencia energética y las energías renovables (públicos y privados) con vistas a garantizar que haya suficiente mano de obra con el nivel adecuado de capacidades para cubrir las necesidades del sector de la construcción, prestando especial atención a los grupos infrarrepresentados;
- p) las campañas de sensibilización y otras herramientas de asesoramiento, y
- q) la promoción de soluciones modulares e industrializadas para la construcción y la renovación de edificios.

Para todas las políticas y medidas:

- nombre de la política o medida
- breve descripción (ámbito de aplicación preciso, objetivo y modalidades de funcionamiento)
- objetivo cuantificado
- tipo de política o medida (por ejemplo, legislativa; económica; fiscal; de formación, de sensibilización)
- presupuesto previsto y fuentes de financiación
- entidades responsables de la ejecución de la política
- repercusiones previstas
- estado de ejecución
- fecha de entrada en vigor
- período de ejecución

Opcionales

Políticas y medidas en relación con los siguientes aspectos:

- a) el aumento de la resiliencia de los edificios frente al cambio climático;
- b) la promoción del mercado de servicios energéticos;

-
- c) el aumento de la seguridad contra incendios;
 - d) el aumento de la resiliencia frente a los riesgos de desastres, incluidos los riesgos relacionados con una actividad sísmica intensa;
 - e) la eliminación de sustancias peligrosas, incluido el amianto;
 - f) la accesibilidad para las personas con discapacidad;
 - g) el papel de las comunidades de energías renovables y las comunidades ciudadanas de energía en los enfoques por distritos y por barrios;
 - h) la manera de abordar la inadecuación en las capacidades humanas, y
 - i) la manera de abordar la mejora en la calidad ambiental interior.

Para todas las políticas y medidas:

- capacidades y recursos administrativos
- ámbitos de actuación
- menos eficientes
- normas mínimas de eficiencia energética
- pobreza energética, vivienda social
- edificios públicos
- residencial (unifamiliar, plurifamiliar)
- no residencial
- industria
- fuentes de energía renovables
- eliminación gradual de los combustibles fósiles en la calefacción y la refrigeración
- emisiones de gases de efecto invernadero del ciclo de vida completo
- economía circular y residuos
- ventanillas únicas
- pasaportes de renovación
- tecnologías inteligentes
- movilidad sostenible en edificios
- enfoques de distrito y de vecindad
- capacidades, formación
- campañas de sensibilización y herramientas de asesoramiento

d) Esquema de las necesidades de inversión, las fuentes presupuestarias y los recursos administrativos

Obligatorios

- necesidades de inversión totales para 2030, 2040 y 2050 (millones EUR)
- inversiones públicas (millones EUR)
- inversiones privadas (millones EUR)
- recursos presupuestarios

e) Umbrales de edificios nuevos y renovados de cero emisiones, a que se refiere el artículo 11

Obligatorios

- umbrales de emisiones de gases de efecto invernadero operativas de los edificios nuevos de cero emisiones
- umbrales de emisiones de gases de efecto invernadero operativas de los edificios renovados de cero emisiones
- umbrales anuales de uso de energía primaria de los edificios nuevos de cero emisiones
- umbrales anuales de uso de energía primaria de los edificios renovados de cero emisiones

f) Normas mínimas de eficiencia energética para edificios no residenciales

Obligatorios

- umbrales máximos de eficiencia energética, con arreglo al artículo 9, apartado 1

g) Normas mínimas de eficiencia energética para edificios residenciales

Obligatorios

- la trayectoria nacional para la renovación progresiva del parque inmobiliario residencial, incluidos los hitos de 2030 y 2035 para el uso medio de energía primaria en kWh/(m² .a), con arreglo al artículo 9, apartado 2

Anexo C

C.1 Datos obtenidos de cada fuente de información

Tabla C.1. Datos obtenidos de cada fuente de información. CEE: Certificado de Eficiencia Energética, CEPNR: Consumo de Energía Primaria No Renovable, GEI: Gases de Efecto Invernadero, INSPIRE: Infrastructure for Spatial Information in Europe, MDT: Modelo Digital del Terreno, CTE DB-HE: Código Técnico de la Edificación – Ahorro de Energía, CNIG: Centro Nacional de Información Geográfica. Elaboración propia, publicada en [100].

Datos obtenidos de los CEE	Datos obtenidos del catastro alfanumérico	Datos obtenidos del catastro INSPIRE	Datos obtenidos de fuentes adicionales de información
Referencia catastral	Referencia catastral	Referencia catastral	Censo: número de habitantes por municipio
Fecha de registro del certificado	Uso del edificio y de los inmuebles	Edificio georreferenciado	MDT: Altitud a la que se encuentra el edificio
CEPNR	Superficie certificable por edificio e inmueble		CTE DB-HE: Zona climática por altitud y provincia
Clase energética de CEPNR	Número de inmuebles que requieren un CEE por edificio		CNIG: Mapa de provincias
Emisiones de GEI	Municipio, Comunidad Autónoma y provincia		
Clase energética de Emisiones de GEI	Número de plantas		
Comunidad Autónoma donde se registró el certificado	Año de construcción		

C.2 Datos obtenidos en cada modelo basado en CEE

Tabla C.2. Datos obtenidos en los tres modelos. Tabular: Información alfanumérica en tablas de datos, GIS: Sistemas de Información Geográfica, CEPNR: Consumo de Energía Primaria No Renovable, GEI: Gases de Efecto Invernadero, CEE: Certificado de Eficiencia Energética, CA: Comunidad Autónoma. Elaboración propia, publicada en [100].

Modelos	B.1 Modelo de comportamiento energético	B.2 Modelo GIS de características de los edificios	B.3 Modelo energético de edificios a escala nacional
Escala de la información	Edificio (tabular)	Edificio (GIS)	Edificio (GIS)
	Inmueble (tabular)		Inmueble (tabular)
Datos en el modelo	Referencia catastral	Referencia catastral	Referencia catastral
	Comportamiento energético (CEPNR y emisiones GEI)	Edificio georreferenciado	Edificio georreferenciado
	Clase energética	Uso principal del edificio	Uso principal del edificio
	Usos certificados	Número de inmuebles que lo forman	Número de inmuebles que lo forman
	Superficie certificada	Número de inmuebles por uso	Número de inmuebles por uso
	Número de inmuebles certificados en el edificio	Superficie construida por uso	Superficie construida por uso
	Número de CEE en el edificio	Año de construcción	Año de construcción
		Número de plantas	Número de plantas
		CA, provincia, municipio	CA, provincia, municipio
		Zona climática	Zona climática
			Comportamiento energético (CEPNR y emisiones GEI)
			Clase energética
			Usos certificados
			Superficie certificada
			Número de inmuebles certificados en el edificio
			Número de CEE en el edificio

C.3 Tabla estándar de datos de los CEE

Para poder tratar de forma homogénea los CEE se han adaptado las estructuras de datos de las CCAA recopilando los siguientes datos:

- Referencia catastral.
- Código postal
- Comunidad Autónoma.
- Provincia
- Municipio
- Código del municipio
- Coordenadas: Latitud
- Coordenadas: Longitud
- Zona Climática
- Identificador del CEE
- Tipo de edificio (catalogado en: Residencial - Vivienda unifamiliar, Residencial - Vivienda individual, Residencial - Bloque completo, Terciario – Local, Terciario - Edificio completo)
- Edificio existente o nuevo
- Fecha de construcción
- Superficie útil
- Dirección
- CEPNR (en kWh/m²a)
- Calificación CEPNR
- Emisiones de GEI (en kgCO_{2eq}/m²a)
- Calificación emisiones de GEI
- Calefacción: CEPNR (en kWh/m²a)
- Calefacción: Calificación CEPNR
- Calefacción: Emisiones de GEI (en kgCO_{2eq}/m²a)
- Calefacción: Calificación emisiones de GEI
- Refrigeración: CEPNR (en kWh/m²a)
- Refrigeración: Calificación CEPNR
- Refrigeración: Emisiones de GEI (en kgCO_{2eq}/m²a)
- Refrigeración: Calificación emisiones de GEI
- ACS: CEPNR (en kWh/m²a)
- ACS: Calificación CEPNR
- ACS: Emisiones de GEI (en kgCO_{2eq}/m²a)
- ACS: Calificación emisiones de GEI
- Iluminación: CEPNR (en kWh/m²a)
- Iluminación: Calificación CEPNR
- Iluminación: Emisiones de GEI (en kgCO_{2eq}/m²a)
- Iluminación: Calificación emisiones de GEI
- Normativa de la edificación
- Normativa de las instalaciones

- Programa informático (empleado para generar el CEE)
- Fecha de registro del CEE
- Renovables: Dispone de solar térmica
- Renovables: Dispone de solar fotovoltaica
- Renovables: Dispone de geotermia
- Renovables: Dispone de biomasa
- Generador de la instalación
- Tipo de generador
- Vector energético
- Código del INE de la CA (añadido de forma automática por el modelo)
- Código del INE de la provincia (añadido de forma automática por el modelo)

C.4 Desglose de datos ofrecidos por el catastro INSPIRE

El catastro INSPIRE ofrece múltiples datos, definidos en [110], los cuales, desglosados corresponden a la categoría Edificios y al archivo building.gml:

- Identificador: ES.SDGC.BU + referencia catastral. Indica que el edificio se encuentra en España, el proveedor de la información es el *Spanish Directorate General for Cadastre*, el tipo de dato es Building y la referencia catastral del edificio para identificarlo de forma unívoca.
- Fecha de alta en la base de datos del catastro.
- Estado de conservación, determinado en ruinoso, deficiente o funcional.
- Fecha de construcción
- Referencia catastral.
- Link a la correspondiente página web del edificio en el catastro.
- Geometría del edificio, huella del edificio definido en forma de polígono o multipolígono.
- Precisión de la geometría: En España es 0.1 metros.
- Uso actual: Uso predominante en el edificio, se ha obtenido tomando el uso con la mayor superficie de todo el edificio. Se categoriza en: residencial, agricultura, industrial, oficina, retail y servicios.
- Número de inmuebles.
- Número de viviendas.
- Enlace a la fotografía del edificio.
- Área de la huella del edificio.

C.5 Desglose de datos ofrecidos por el catastro alfanumérico

El catastro alfanumérico ofrece los siguientes datos sobre los tipos de registro que se han empelado en esta investigación, definidos en [198] [130]:

Datos para el tipo de registro de Finca:

- Referencia catastral de la parcela.
- Nombre Provincia.
- Código de Provincia (INE).
- Nombre del Municipio.
- Código del Municipio (según DGC).
- Código del Municipio (INE).
- Dirección, desglosada en tipo de vía, calle, número, etc.
- Código postal.
- Códigos de zona de concentración, polígono, parcela y paraje.
- Superficie de la finca.
- Superficie construida total.
- Superficie sobre rasante.
- Superficie bajo rasante.
- Superficie cubierta.
- Coordenadas X e Y del centroide de la parcela.
- Huso geográfico.

Datos para el tipo de registro de Unidad Constructiva:

- Referencia catastral de la parcela a la que pertenece.
- Código de la Unidad Constructiva, un número para identificar cada unidad constructiva dentro de la parcela.
- Datos sobre la provincia y el municipio.
- Dirección.
- Año de construcción.
- Indicador de exactitud del año de construcción. Categorizado en Exacto, aproximado por encima, aproximado por debajo y aproximado.
- Superficie en planta de la unidad constructiva.
- Longitud de fachada en centímetros.

Datos para el tipo de registro de Bien Inmueble:

- Referencia catastral de la parcela a la que pertenece.
- Número secuencial del bien inmueble, también llamado número de cargo, y los dos caracteres de control. Junto con la referencia catastral de la parcela forman la referencia catastral del inmueble.
- Número fijo del Bien Inmueble
- Número de finca registral
- Datos sobre la provincia y el municipio, al igual que en los datos de finca.

- Dirección, al igual que en los datos de finca.
- Número de orden del inmueble en la escritura de división horizontal.
- Año de antigüedad del bien inmueble
- Uso del bien inmueble. Denominado Clave de grupo de los bienes inmuebles de características especiales o de uso de los bienes urbanos. Indica el uso principal del bien, está categorizado en:
 - Bienes inmuebles de características especiales, destinados a la producción de energía, presas y embalses, autopistas y aeropuertos y zonas comerciales.
 - Almacén – Estacionamiento
 - Residencial
 - Industrial
 - Oficinas
 - Comercial
 - Deportivo
 - Espectáculos
 - Ocio y Hostelería
 - Sanidad y Beneficencia
 - Cultural
 - Religioso
 - Obras de urbanización y jardinería, suelos sin edificar
 - Edificio singular
 - Almacén agrario
 - Industrial agrario
 - Agrario
- Superficie de los elementos constructivos que forman el bien inmueble.
- Coeficiente de propiedad de la finca.

Datos para el tipo de registro de Construcción:

- Referencia catastral de la parcela a la que pertenece.
- Número de orden del bien inmueble al que pertenece.
- Número de orden de la construcción dentro del bien inmueble.
- Código de la Unidad Constructiva donde se encuentra la construcción.
- Bloque, escalera, planta y puerta donde se encuentra.
- Uso de la construcción, denominado Código de la Unidad Constructiva. Define el uso de la construcción desglosado en 172 categorías de usos.
- Indicador de reforma o rehabilitación. Clasificado en [242]:
 - Rehabilitación integral: Intervenciones con una cuantía económica superior al 75% del valor de realizar esa misma obra de nueva planta.
 - Reforma total: Intervenciones con un coste de entre el 50 y el 75% del valor de realizar esa obra de nueva planta.
 - Reforma media: Intervenciones con un coste de entre el 25 y el 50%

- Reforma mínima: Intervenciones con un coste menor al 25%.
- Año de reforma.
- Año de antigüedad efectiva en Catastro. Pondera la fecha original de construcción con las de reforma para obtener valores a efectos de valoraciones catastrales.
- Superficie total del local incluidos porches y terrazas.
- Superficie de porches y terrazas del local.
- Superficie imputable al local situada en otras plantas.
- Tipología constructiva según Normas Técnicas de Valoración. Indica la tipología de edificación en la que se encuentra la construcción, por ejemplo, Viviendas colectivas en edificación abierta, Viviendas colectivas en manzana cerrada, etc.
- Calidad de la construcción. Se indica en el último dígito de la tipología y va de 1, perfecto estado de conservación, a 9 el peor estado de conservación.
- Código de modalidad de reparto, para elementos comunes.

C.6 Criterios empleados para filtrar CEE

La tabla C.6 indica los criterios empleados para excluir los CEE del modelo por contener valores atípicos en CEPNR, emisiones de GEI o sus clases, la fecha de registro o la existencia de CEE más recientes.

Tabla C.6. Criterios empleados para detectar CEE con valores atípicos. CEPNR: Consumo de Energía Primaria No Renovable, GEI: Gases de Efecto Invernadero, CEE: Certificado de Eficiencia Energética. Elaboración propia, publicada en [100].

Criterio para filtrar los datos	Umbrales
CEPNR	$\leq 629,7 \text{ kWh/m}^2\text{a}$
Clase energética de CEPNR	Una letra de la A a la G
Emisiones de GEI	$\leq 333,1 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{m}^2\text{a}$
Clase de emisiones de GEI	Una letra de la A a la G
Fecha de registro del CEE	Entre el 1 de enero de 2013 y el 1 de enero de 2023 (CEE en vigor)
Eliminar CEE duplicados	Únicamente se emplea el más reciente

Basado en lo desarrollado por Las Heras Casas et al. [243], el criterio empleado para seleccionar los umbrales de CEPNR y emisiones de GEI, es utilizar como valor de referencia 1,5 veces el umbral de la letra G más desfavorable en España. El umbral de emisiones de GEI se obtiene multiplicando el umbral de CEPNR por el vector energético más desfavorable [244].

Para el estudio del capítulo 4, se consideraron los CEE a fecha de 1 de enero de 2023 y se descartaron los que ya no están en vigor. Esto ocurre en el caso de los CEE con más de diez años y aquellos que han sido actualizados con un certificado más reciente.

C.7 Información ampliada del paso B.1.2: Detección de valores atípicos en los CEE

Los criterios utilizados para rechazar los CEE debido a información incorrecta se muestran en la tabla C.7.

Tabla C.7. Criterios para rechazar CEE debidos a información incorrecta. CEE: certificado de Eficiencia Energética, CCAA: Comunidades Autónomas, CA: Comunidad Autónoma. Elaboración propia, publicada en [100].

Criterio para filtrar los datos	Elementos eliminados
Los CEE deben tener una referencia catastral existente	Referencia no especificada, inexistente en el catastro alfanumérico o referencia catastral con errores
Los CEE deben tener un uso certificable	Usos no certificables: uso de almacenamiento-aparcamiento, obras de urbanización, agricultura, industrial, industrial-agrícola y almacenamiento agrícola
El CEE debe estar registrado en la misma CCAA que el edificio	El edificio se encuentra en una CA diferente a aquella en la que fue registrado

Para vincular los datos del catastro alfanumérico con los CEE, estos últimos debían tener una referencia catastral válida. Los CEE que contenían errores en la referencia fueron descartados. Los CEE de la CCAA de Navarra se excluyeron por completo de este estudio, ya que no forman parte del catastro español.

El catastro alfanumérico diferencia entre dieciséis usos de inmuebles. De estos, seis no requieren climatización y por tanto no precisan de un CEE, de acuerdo con el RD 390/2021 [113], de 1 de junio, que aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios en España. Estos seis usos no certificables se muestran en la tabla C.7. Algunos CEE están asignados estos usos y fueron descartados. Los CEE incluidos en este estudio corresponden a los siguientes diez usos certificables: residencial, oficinas, comercial, deportes, espectáculos, ocio y hostelería, sanitario y beneficencia, cultural, religioso y edificios singulares.

Se detectaron algunos certificados registrados en la Comunidad Autónoma equivocada. Estos CEE también fueron descartados, ya que, según la normativa, los CEE deben registrarse en la CA donde se encuentra el edificio.

C.8 Número y porcentajes de CEE válidos tras el filtrado

Como resultado del proceso de detección de valores atípicos aplicando los criterios mostrados en las tablas C.6 y C.7, se encontraron 2.966.479 CEE válidos, lo que representa el 75,67 % de los CEE. Estos CEE, que pueden aplicarse a un edificio completo o inmueble, corresponden a un total de 1.202.708 edificios con al menos un CEE, lo que representa el 12,93 % de los edificios existentes en España con un uso certificable. La tabla C.8 muestra el número y porcentaje de certificados válidos por Comunidad Autónoma.

Tabla C.8. Porcentaje de CEE válidos en cada CA tras aplicar los criterios de detección de valores atípicos. Elaboración propia, publicada en [100].

Comunidad Autónoma	Número de CEE registrados	Número de CEE tras los filtrados	Porcentaje de CEE válidos
Andalucía	548.359	490.219	89,40%
Aragón	161.830	145.688	90,03%
Asturias	59.807	28.588	47,80%
Islas Baleares	158.678	69.777	43,97%
Islas Canarias	189.450	105.726	55,81%
Cantabria	83.544	56.305	67,40%
Castilla y León	202.643	169.181	83,49%
Castilla La Mancha	146.000	117.760	80,66%
Cataluña	1.371.455	1.041.595	75,95%
Comunidad Valenciana	711.988	583.348	81,93%
Galicia	183.939	124.025	67,43%
La Rioja	42.604	34.267	80,43%
Navarra	60.057	0	0,00%
Total	3.920.354	2.966.479	75,67%

C.9 Número y porcentajes de CEE válidos tras el filtrado

Fórmulas para ponderar el consumo medio de energía primaria no renovable y las emisiones de GEI de los edificios sin CEE general y con uno o varios CEE de sus inmuebles

$$eq(1) C_{edificio} = \frac{\sum_{n=1}^N (C_{inmueble} * S_{inmueble})}{S_{Total\ inmuebles}}$$

$$eq(2) E_{edificio} = \frac{\sum_{n=1}^N (E_{inmueble} * S_{inmueble})}{S_{Total\ inmuebles}}$$

Donde:

$C_{edificio}$ = CEPNR medio del edificio

$C_{inmueble}$ = CEPNR de cada inmueble certificado

$E_{edificio}$ = Emisiones de GEI medias del edificio

$E_{inmueble}$ = Emisiones de GEI de cada inmueble certificado

N = número total de CEE

$S_{inmueble}$ = Superficie construida de cada inmueble certificado

$S_{Total\ inmuebles}$ = Superficie construida de todos los inmuebles certificados

Anexo D

D.1 Análisis comparativo del modelo nUBEM con otros modelos en base a sus objetivos, método de generación, resultados, alcance y reproducibilidad

Tabla D.1. Comparación del modelo nUBEM con otros modelos en base a sus objetivos, escala, enfoque, datos de entrada y si requiere clasificar por arquetipos o calibración. Elaboración propia.

Dimensión	Objetivo principal / Escala	Enfoque principal	Entradas necesarias	Arquetipos / Calibración
nUBEM	Analizar el consumo energético y las	Híbrido: simulación de los CEE +	Catastro, CEE, otros datos abiertos	No emplea arquetipos / requiere

	emisiones del parque edificado nacional español / Edificio a edificio	Machine Learning		entrenamiento del algoritmo
Bass et al. 2022 (AutoBEM) [33]	Analizar el consumo energético del parque edificado nacional americano / Edificio a edificio	Simulación de edificios individuales en base a arquetipos	Datos físicos de los edificios	Arquetipos
Filogamo et al. 2014 [228]	Clasificar el parque residencial en tipologías para planificación energética regional / Región	Clasificación estadística mediante tipologías representativas	Datos catastrales, censos, tipologías constructivas	Sí, clasificación de arquetipos para todo el parque edificado
Olivo et al. 2017 [229]	Analizar la variabilidad espacio- temporal del consumo en Nueva York / Códigos postales	Análisis estadístico y geoespacial de consumos	Simulaciones de edificios individuales y datos climáticos	Simulaciones individuales de edificios representativos
Gassar et al. 2019 [230]	Predicción del consumo energético residencial a escala urbana en Londres / Edificio a edificio	Modelo de ML	Datos socioeconómico s, censales y físicos del edificio	Requiere entrenamiento del algoritmo

Wang et al. 2018 (CESAR) [231]	Analizar el consumo energético y las emisiones del parque edificado nacional suizo / Edificio a edificio	Simulación de edificios individuales en base a arquetipos	Datos físicos de los edificios, datos climáticos	Sí, definición explícita de arquetipos + calibración con consumos reales
Johari et al. 2023 [232]	Desarrollo de un UBEM basado en CEE para simulaciones y escenarios de rehabilitación / Edificio a edificio	Híbrido: simulación de edificios individuales y uso de CEE para calibración	CEE, clima, datos físicos de edificios	No arquetipos explícitos, calibración a partir de CEE y datos medidos
Johari et al. 2023 [233]	Analizar el impacto de los edificios residenciales de una ciudad en la red eléctrica y el impacto de su rehabilitación / Edificio a edificio	Análisis de datos	Datos del operador del sistema de distribución eléctrica de la ciudad, CEE	Sí, clasificación de arquetipos para todo el parque edificado
Aguacil et al. 2017 [170]	Evaluar estrategias de rehabilitación urbana a escala territorial aplicando metodología coste-óptima	Enfoque estadístico macro a nivel territorial con optimización de costes	Datos estadísticos de edificios, censos, costes energéticos	Sí, clasificación de arquetipos para todo el parque edificado
Heidenthaler et al. 2023 [164]	Predicción del consumo de energía a escala	Híbrido: CEE + simulación simplificada automatizada	CEE, clima detallado, información	Sí, clustering derivado de CEE y

	distrito usando CEE		georreferenciad a	calibración parcial
Li & Yao 2021 [147]	Modelar demanda de calefacción y refrigeración de un conjunto de edificios usando una aproximación híbrida	Híbrido: simulación física + machine learning	Censos, clima, consumos históricos, datos físicos	Sí, arquetipos físicos + ajuste estadístico
Garbasevschi et al. 2021 [148]	Analizar factores espaciales que afectan la predicción de antigüedad de edificios y su impacto en modelos energéticos	Modelo de ML aplicado a predicción de antigüedad	Datos espaciales, censos, tipologías	Usa arquetipos, enfoque estadístico puro

Tabla D.2. Comparación del modelo nUBEM con otros modelos en base a su resolución espacial, tipo de datos de entrada, resultados, esfuerzo computacional y reproducibilidad. Elaboración propia.

Dimensión	Resolución espacial	Tipo de datos de entrada	Resultados	Esfuerzo computacion al	Reproducibi lidad
nUBEM	Edificio a edificio, agrupable a distintas escalas (barrio, municipio, región)	Datos geográficos y alfanumérico s	CEPNR, emisiones GEI	Bajo, optimizado para ejecución a gran escala, no realiza simulaciones	Alta, datos de partida en abierto, los resultados se publicarán en abierto y código en abierto y documentad o

Bass et al. 2022 (AutoBEM) [33]	Edificio a edificio	Datos alfanuméricos	Intensidad energética anual	Muy alto, gran cantidad de simulaciones energéticas, requiere supercomputadora	Baja, datos y código no publicados en abierto, requiere de supercomputadora
Filogamo et al. 2014 [228]	Región	Datos geográficos y alfanuméricos	Consumo Energético	Bajo, clustering estadístico	Alta, las tipologías generadas son replicables, resultados y código no publicados en abierto
Olivo et al. 2017 [229]	Códigos postales, distrito y ciudad	Datos geográficos y alfanuméricos	Uso Energético Anual, patrones espacio-temporales de consumo	Alto, simulaciones energéticas	Baja, simulaciones no disponibles y los resultados dependen del modelo climático de Nueva York
Gassar et al. 2019 [230]	Distrito y ciudad	Datos alfanuméricos	Predicción de consumo energético residencial total	Bajo, requiere el entrenamiento del modelo de ML	Alta, si los datos socioeconómicos son abiertos, resultados y código no publicados en abierto
Wang et al. 2018 (CESAR) [231]	Edificio individual y agregado	Datos geográficos y alfanuméricos	Demanda de calefacción, consumo de energía	Muy alto, gran cantidad de simulaciones	Baja, datos no publicados, código en

	regional y nacional			energéticas, requiere supercomputadora	abierto y documentado, requiere de supercomputadora
Johari et al. 2023 [232]	Edificio a edificio georreferenciado	Datos geográficos y alfanuméricos	Demanda Energética Anual	Medio, simulación y calibración	Media, datos y código no publicados en abierto
Johari et al. 2023 [233]	Zonas de la ciudad	Datos geográficos y alfanuméricos	Demanda Energética Anual	Muy bajo, análisis de datos	Muy baja, requiere de los datos del operador del sistema de distribución eléctrica de la ciudad, resultados y código no publicados en abierto
Aguacil et al. 2017 [170]	Ciudad	Datos geográficos y alfanuméricos	Coste-óptimo de medidas de rehabilitación a gran escala	Bajo, cálculo macro y optimización	Media, datos de partida en abierto, resultados y código no publicados en abierto
Heidenthaler et al. 2023 [164]	Edificio individual dentro de district heatings	Datos geográficos y alfanuméricos	Perfiles de consumo de energía	Bajo, simulación simplificada	Media, dependiente de bases de CEE y clima detallado, resultados y código no publicados en abierto

Li & Yao 2021 [147]	Edificio a edificio georreferenci ado	Datos geográficos y alfanumérico s	Demanda de calefacción/r efrigeración	Medio, mezcla de simulación y estadística	Media, el modelo ha sido entrenado con datos muy locales, resultados y código no publicados en abierto
Garbasevski et al. 2021 [148]	Edificio a edificio	Datos geográficos y alfanumérico s	Mapas de antigüedad predicha, factores espaciales clave	Bajo	Alta, datos de partida en abierto, resultados y código no publicados en abierto

Anexo E

E.1 Desglose del número de edificios, superficie construida, número de viviendas y número de bienes inmuebles en el parque edificado nacional

Tabla E.1. Número de edificios, superficie construida (m²), número de viviendas, bienes inmuebles y edificios con certificados de eficiencia energética por tipo de edificio y zona climática. Uu – unifamiliar, Cc – Bloque plurifamiliar de 3 o menos plantas, Bb – Bloque plurifamiliar de 4 o más plantas, Tt – Edificios de uso no residencial y periodo de construcción (sólo edificios y superficies que requieren de climatización). Elaboración propia.

Zona climática	Tipo de edificio	Número de edificios	Superficie construida	Número de viviendas	Número de bienes inmuebles	Número de edificios certificados
Alpha3	Uu <1940	32.896	4.798.957	32.896	45.382	2.707
	Uu 41-60	21.387	3.066.777	21.387	22.163	1.903
	Uu 61-80	46.624	7.713.166	46.624	50.964	4.179
	Uu 81-07	62.490	11.179.842	62.490	70.176	6.495
	Uu 08-13	4.218	871.147	4.218	4.487	545
	Uu 14-17	841	173.024	841	873	166
	Uu 18-19	437	90.178	437	441	191
	Uu 20-24	854	224.005	854	864	376
	Cc <1940	1.778	553.980	5.370	6.643	363

A2	Cc 41-60	2.422	713.608	7.722	8.730	547
	Cc 61-80	7.322	2.432.250	28.465	33.359	1.607
	Cc 81-07	16.166	13.167.012	145.041	200.778	6.888
	Cc 08-13	1.471	1.505.914	14.828	21.523	740
	Cc 14-17	137	109.154	1.140	1.626	57
	Cc 18-19	91	64.251	589	792	27
	Cc 20-24	162	198.758	1.811	2.449	28
	Bb <1940	380	212.263	2.004	2.829	157
	Bb 41-60	1.789	1.211.066	14.084	16.549	922
	Bb 61-80	7.312	10.589.878	122.057	156.644	4.467
	Bb 81-07	8.638	15.574.754	168.469	295.798	5.421
	Bb 08-13	1.012	1.791.898	19.145	38.001	634
	Bb 14-17	66	90.702	927	1.782	28
	Bb 18-19	67	173.301	1.808	3.243	30
	Bb 20-24	169	355.587	3.788	6.813	39
	Tt <1940	2.211	132.647	0	4.237	202
	Tt 41-60	1.126	88.508	0	1.734	125
	Tt 61-80	3.875	1.019.104	0	38.171	868
	Tt 81-07	7.349	919.930	0	89.731	1.763
	Tt 08-13	691	19.150	0	3.764	120
	Tt 14-17	198	2.904	0	751	34
	Tt 18-19	84	1.874	0	445	19
	Tt 20-24	134	1.410	0	346	29
	Uu <1940	14.888	2.078.405	14.888	21.593	1.153
	Uu 41-60	9.653	1.225.207	9.653	9.950	732
	Uu 61-80	19.249	2.845.511	19.249	19.980	1.666
	Uu 81-07	19.944	3.372.545	19.944	21.390	2.110
	Uu 08-13	1.428	264.015	1.428	1.534	197
	Uu 14-17	232	39.715	232	241	33
	Uu 18-19	72	12.482	72	72	24
	Uu 20-24	134	26.572	134	135	31
	Cc <1940	860	243.820	2.259	2.992	129
	Cc 41-60	929	222.040	2.313	2.550	151
	Cc 61-80	2.509	656.394	6.867	8.127	451
	Cc 81-07	3.330	2.511.614	24.034	33.855	1.365
	Cc 08-13	386	385.553	3.544	5.700	228
	Cc 14-17	23	14.873	132	160	4
	Cc 18-19	14	16.338	152	328	6
	Cc 20-24	20	17.303	168	272	8
	Bb <1940	45	18.822	179	225	12
	Bb 41-60	196	82.641	961	1.159	73
	Bb 61-80	1.619	1.171.723	13.519	16.402	785

Modelado urbano de consumo energético en edificación basado en datos abiertos e IA para el diagnóstico del parque edificado europeo: el caso de España

Carlos Beltrán Velamazán

A3	Bb 81-07	1.569	2.081.786	21.761	35.905	866
	Bb 08-13	169	314.966	3.377	6.782	114
	Bb 14-17	8	26.643	294	506	2
	Bb 18-19	3	8.527	98	246	2
	Bb 20-24	13	26.887	279	550	3
	Tt <1940	767	24.995	0	1.077	36
	Tt 41-60	340	9.123	0	370	23
	Tt 61-80	762	18.755	0	902	61
	Tt 81-07	1.105	27.697	0	3.260	127
	Tt 08-13	124	2.435	0	980	24
	Tt 14-17	35	65	0	37	2
	Tt 18-19	12	420	0	15	5
	Tt 20-24	20	581	0	21	5
	Uu <1940	14.680	2.676.644	14.680	21.243	1.374
	Uu 41-60	14.977	1.837.202	14.977	15.281	1.929
	Uu 61-80	48.605	7.042.858	48.605	49.692	7.889
	Uu 81-07	81.663	13.914.165	81.663	84.723	14.659
	Uu 08-13	5.457	1.233.508	5.457	6.013	997
	Uu 14-17	1.544	391.112	1.544	1.592	421
	Uu 18-19	1.065	272.034	1.065	1.107	447
	Uu 20-24	2.179	578.749	2.179	2.196	1.065
	Cc <1940	2.418	830.732	9.346	11.245	712
	Cc 41-60	1.648	574.332	7.303	7.797	553
	Cc 61-80	5.140	1.921.317	22.569	26.067	1.901
	Cc 81-07	12.109	14.968.666	142.523	213.321	7.121
	Cc 08-13	1.249	1.949.102	19.367	31.387	796
	Cc 14-17	89	151.641	1.360	2.274	38
	Cc 18-19	104	221.296	1.617	2.551	44
	Cc 20-24	275	747.138	5.681	9.681	90
	Bb <1940	861	543.804	5.565	7.127	529
	Bb 41-60	763	840.472	10.231	11.278	601
	Bb 61-80	7.243	14.710.980	173.282	212.513	6.128
	Bb 81-07	7.030	24.957.084	243.861	428.032	5.886
	Bb 08-13	656	2.363.421	25.265	49.100	514
	Bb 14-17	80	371.057	3.526	7.381	46
	Bb 18-19	73	307.780	2.449	4.171	41
	Bb 20-24	226	1.156.611	9.625	16.835	101
	Tt <1940	1.585	65.747	0	2.383	115
	Tt 41-60	954	66.300	0	1.394	104
	Tt 61-80	3.092	53.287	0	10.787	382
	Tt 81-07	5.525	68.565	0	30.014	806
	Tt 08-13	801	19.236	0	3.983	119

A4	Tt 14-17	218	1.129	0	548	29
	Tt 18-19	116	353	0	141	26
	Tt 20-24	218	2.108	0	233	60
	Uu <1940	8.832	1.023.274	8.832	10.861	865
	Uu 41-60	7.599	896.901	7.599	7.835	806
	Uu 61-80	21.276	2.672.812	21.276	21.966	2.715
	Uu 81-07	47.017	6.571.529	47.017	49.149	6.569
	Uu 08-13	2.873	526.828	2.873	3.089	420
	Uu 14-17	669	131.731	669	687	83
	Uu 18-19	485	88.219	485	489	112
	Uu 20-24	1.230	235.617	1.230	1.235	391
	Cc <1940	857	258.204	2.632	3.405	179
	Cc 41-60	729	211.200	2.410	2.724	244
	Cc 61-80	2.988	1.084.013	12.522	14.382	915
	Cc 81-07	7.859	6.942.848	75.970	107.830	3.734
	Cc 08-13	814	989.737	10.261	15.973	466
	Cc 14-17	71	54.445	490	549	17
	Cc 18-19	37	47.963	364	466	12
	Cc 20-24	114	124.686	980	1.328	28
	Bb <1940	57	71.684	806	1.263	35
	Bb 41-60	613	442.563	5.623	6.223	500
	Bb 61-80	4.774	6.795.872	76.273	95.593	3.870
	Bb 81-07	5.481	12.902.078	134.052	245.372	4.431
	Bb 08-13	681	2.503.251	26.178	52.923	525
	Bb 14-17	27	76.158	772	1.289	8
	Bb 18-19	26	102.518	808	2.112	13
	Bb 20-24	81	420.630	3.513	7.419	23
	Tt <1940	777	23.290	0	1.194	81
	Tt 41-60	402	8.580	0	460	45
	Tt 61-80	1.332	25.197	0	2.199	140
	Tt 81-07	3.181	36.083	0	14.697	430
	Tt 08-13	478	5.252	0	3.181	76
	Tt 14-17	132	12.272	0	155	23
	Tt 18-19	61	1.760	0	144	14
	Tt 20-24	85	0	0	139	21
B3	Uu <1940	142.762	20.701.728	142.762	177.251	17.492
	Uu 41-60	60.279	8.088.976	60.279	63.587	7.229
	Uu 61-80	112.057	15.744.898	112.057	119.739	15.507
	Uu 81-07	150.456	24.387.386	150.456	162.697	22.544
	Uu 08-13	14.175	2.921.211	14.175	16.649	2.177
	Uu 14-17	3.560	812.755	3.560	3.792	923
	Uu 18-19	2.510	565.805	2.510	2.582	1.079

	Uu 20-24	5.196	1.305.357	5.196	5.349	2.598
	Cc <1940	12.599	3.211.872	32.253	38.437	3.767
	Cc 41-60	8.748	2.287.378	23.865	27.332	2.415
	Cc 61-80	19.620	6.857.839	73.906	91.181	5.675
	Cc 81-07	30.487	24.140.112	232.386	329.772	13.060
	Cc 08-13	3.307	3.368.073	30.449	51.714	1.690
	Cc 14-17	398	358.325	3.035	4.347	108
	Cc 18-19	330	304.377	2.363	3.269	68
	Cc 20-24	639	696.070	5.702	8.473	113
	Bb <1940	6.290	4.533.038	42.241	55.170	4.359
	Bb 41-60	6.092	7.250.110	74.435	87.110	4.836
	Bb 61-80	32.052	56.969.970	589.217	779.681	25.882
	Bb 81-07	27.621	64.333.436	605.872	1.173.285	20.662
	Bb 08-13	3.992	8.951.512	89.071	191.457	2.935
	Bb 14-17	261	584.614	5.154	10.973	112
	Bb 18-19	193	422.757	3.596	8.051	72
	Bb 20-24	553	2.180.844	18.500	40.803	124
	Tt <1940	7.863	289.485	0	13.304	740
	Tt 41-60	3.452	98.351	0	4.628	427
	Tt 61-80	9.131	262.942	0	22.737	1.461
	Tt 81-07	15.468	347.207	0	53.331	2.257
	Tt 08-13	2.436	48.241	0	15.167	405
	Tt 14-17	648	15.288	0	1.189	86
	Tt 18-19	305	5.179	0	621	66
	Tt 20-24	449	5.698	0	633	122
B4	Uu <1940	87.105	13.438.465	87.105	113.594	8.892
	Uu 41-60	70.933	9.663.497	70.933	72.250	8.673
	Uu 61-80	151.951	21.036.653	151.951	156.228	24.486
	Uu 81-07	277.843	39.499.619	277.843	288.333	54.607
	Uu 08-13	23.801	3.963.815	23.801	24.776	4.087
	Uu 14-17	4.805	897.132	4.805	4.926	1.310
	Uu 18-19	2.643	491.478	2.643	2.665	1.202
	Uu 20-24	4.972	996.336	4.972	5.112	2.436
	Cc <1940	4.417	1.522.197	14.744	22.593	1.119
	Cc 41-60	4.395	1.313.952	14.189	16.043	1.555
	Cc 61-80	11.233	3.892.731	40.888	47.920	3.647
	Cc 81-07	25.346	26.193.589	274.435	378.028	13.714
	Cc 08-13	3.092	3.989.244	38.594	60.787	1.935
	Cc 14-17	415	773.506	8.178	11.820	172
	Cc 18-19	263	437.603	4.461	6.457	83
	Cc 20-24	609	943.967	8.282	11.498	248
	Bb <1940	1.084	811.207	8.462	11.211	627

	Bb 41-60	3.792	3.221.603	38.421	43.802	3.054
	Bb 61-80	25.336	36.694.481	412.084	498.282	21.584
	Bb 81-07	19.695	49.843.900	507.314	902.246	15.885
	Bb 08-13	2.256	6.328.155	63.832	132.813	1.753
	Bb 14-17	195	836.171	8.341	16.916	112
	Bb 18-19	203	951.217	8.485	18.038	72
	Bb 20-24	471	2.402.829	21.043	42.618	131
	Tt <1940	6.206	247.882	0	9.046	444
	Tt 41-60	3.511	116.545	0	3.921	384
	Tt 61-80	8.621	189.679	0	16.396	1.047
	Tt 81-07	18.329	309.262	0	63.875	2.424
	Tt 08-13	3.233	53.547	0	12.999	423
	Tt 14-17	744	7.275	0	1.241	99
	Tt 18-19	359	1.165	0	535	49
	Tt 20-24	525	5.269	0	1.093	148
C1	Uu <1940	129.053	19.150.018	129.053	182.866	7.351
	Uu 41-60	30.759	4.373.280	30.759	32.294	2.528
	Uu 61-80	61.223	9.730.836	61.223	64.239	4.606
	Uu 81-07	86.146	15.724.587	86.146	91.264	7.410
	Uu 08-13	15.120	2.874.232	15.120	16.190	1.566
	Uu 14-17	3.627	665.872	3.627	3.759	612
	Uu 18-19	1.152	216.327	1.152	1.172	413
	Uu 20-24	2.751	529.119	2.751	2.770	1.350
	Cc <1940	4.805	1.368.651	13.799	18.204	1.319
	Cc 41-60	3.377	1.039.054	12.383	14.059	1.246
	Cc 61-80	4.960	1.554.734	15.979	20.991	1.181
	Cc 81-07	8.143	8.414.971	78.616	117.959	4.188
	Cc 08-13	1.371	2.016.961	20.241	32.169	949
	Cc 14-17	125	136.597	1.205	1.936	53
	Cc 18-19	55	64.263	536	784	23
	Cc 20-24	153	180.442	1.397	2.582	36
	Bb <1940	2.527	1.665.060	16.222	21.377	1.918
	Bb 41-60	3.031	2.603.243	26.989	33.043	2.292
	Bb 61-80	13.438	18.748.929	194.588	265.602	10.470
	Bb 81-07	13.368	29.341.680	284.717	481.768	10.496
	Bb 08-13	1.526	4.612.991	47.636	93.108	1.299
	Bb 14-17	97	245.185	2.411	4.405	47
	Bb 18-19	56	160.298	1.452	3.458	20
	Bb 20-24	136	393.935	3.408	7.508	38
	Tt <1940	7.167	318.158	0	10.712	365
	Tt 41-60	1.564	40.125	0	1.986	127
	Tt 61-80	3.712	124.741	0	5.002	386

C2	Tt 81-07	8.572	269.170	0	18.774	1.070
	Tt 08-13	1.710	50.867	0	3.546	206
	Tt 14-17	537	11.058	0	647	66
	Tt 18-19	201	2.846	0	214	50
	Tt 20-24	329	6.515	0	418	81
	Uu <1940	86.507	18.562.972	86.507	100.508	22.289
	Uu 41-60	45.252	7.892.008	45.252	46.830	11.649
	Uu 61-80	102.475	17.235.049	102.475	106.081	27.513
	Uu 81-07	132.842	22.099.183	132.842	138.775	34.524
	Uu 08-13	10.643	2.496.504	10.643	11.317	3.148
	Uu 14-17	2.724	690.164	2.724	2.777	1.250
	Uu 18-19	1.850	450.730	1.850	1.869	1.186
	Uu 20-24	4.270	1.298.428	4.270	4.421	2.821
	Cc <1940	7.741	2.411.264	27.074	32.165	4.479
	Cc 41-60	7.612	2.239.835	26.317	30.437	4.235
	Cc 61-80	21.151	10.277.891	126.038	160.983	13.459
	Cc 81-07	20.904	15.544.110	137.767	247.625	14.001
	Cc 08-13	1.891	1.546.330	14.532	28.728	1.320
	Cc 14-17	207	180.578	1.347	2.434	84
	Cc 18-19	235	214.652	1.675	3.024	93
	Cc 20-24	532	444.077	3.757	6.783	142
C3	Bb <1940	10.631	10.500.568	121.152	139.650	9.842
	Bb 41-60	7.254	8.854.181	101.784	116.222	6.553
	Bb 61-80	41.589	71.603.578	834.158	1.125.739	38.736
	Bb 81-07	24.587	46.290.334	443.472	943.841	21.288
	Bb 08-13	2.988	6.013.948	63.527	140.887	2.558
	Bb 14-17	499	1.330.271	11.645	26.852	235
	Bb 18-19	433	1.162.508	10.070	22.916	142
	Bb 20-24	1.013	2.674.979	24.009	57.567	235
	Tt <1940	6.682	198.240	0	9.280	1.329
	Tt 41-60	2.975	80.527	0	4.116	586
	Tt 61-80	9.036	195.627	0	32.174	1.964
	Tt 81-07	12.272	149.403	0	63.504	3.071
	Tt 08-13	1.769	36.375	0	11.286	552
	Tt 14-17	705	8.275	0	1.687	227
	Tt 18-19	249	8.062	0	446	80
	Tt 20-24	463	21.904	0	888	160
C3	Uu <1940	228.034	30.206.827	228.034	282.792	22.213
	Uu 41-60	95.836	12.293.541	95.836	98.607	8.852
	Uu 61-80	162.691	21.723.028	162.691	169.641	19.910
	Uu 81-07	228.659	35.447.186	228.659	241.075	32.639
	Uu 08-13	22.919	4.265.704	22.919	24.104	3.505

	Uu 14-17	4.328	856.191	4.328	4.463	1.045
	Uu 18-19	2.607	524.965	2.607	2.642	1.104
	Uu 20-24	5.423	1.134.207	5.423	5.484	2.557
	Cc <1940	8.018	2.129.987	20.275	23.777	1.645
	Cc 41-60	7.708	2.080.948	22.376	24.745	1.764
	Cc 61-80	15.564	5.048.964	48.868	61.127	3.073
	Cc 81-07	26.239	20.911.115	180.277	256.961	8.209
	Cc 08-13	3.401	4.136.152	37.202	56.235	1.639
	Cc 14-17	254	264.253	2.047	2.685	68
	Cc 18-19	187	215.326	1.669	2.310	49
	Cc 20-24	436	712.324	5.463	7.345	113
	Bb <1940	3.127	1.425.096	14.082	19.095	1.454
	Bb 41-60	3.103	2.505.793	26.538	31.769	1.745
	Bb 61-80	23.040	39.910.692	402.511	539.480	15.843
	Bb 81-07	23.546	48.100.168	434.659	833.304	12.747
	Bb 08-13	4.484	9.795.346	96.756	197.912	2.372
	Bb 14-17	240	537.614	5.080	10.967	82
	Bb 18-19	143	393.458	3.456	7.015	40
	Bb 20-24	416	1.482.018	12.167	23.774	76
	Tt <1940	11.310	556.759	0	15.760	766
	Tt 41-60	4.186	142.066	0	4.838	366
	Tt 61-80	9.924	275.474	0	16.045	1.004
	Tt 81-07	21.251	431.774	0	47.003	2.247
	Tt 08-13	3.478	86.532	0	14.762	429
	Tt 14-17	718	10.035	0	1.186	109
	Tt 18-19	370	2.358	0	569	61
	Tt 20-24	597	6.005	0	966	117
C4	Uu <1940	153.469	21.284.921	153.469	183.834	5.632
	Uu 41-60	130.129	17.561.656	130.129	133.257	7.647
	Uu 61-80	117.690	16.568.713	117.690	123.146	7.116
	Uu 81-07	221.296	33.309.319	221.296	233.877	12.667
	Uu 08-13	28.017	4.579.373	28.017	29.988	1.861
	Uu 14-17	5.586	963.521	5.586	5.837	428
	Uu 18-19	3.075	535.726	3.075	3.141	313
	Uu 20-24	5.074	914.403	5.074	5.142	1.152
	Cc <1940	7.928	2.701.891	23.311	33.687	635
	Cc 41-60	5.864	1.735.197	16.826	19.122	816
	Cc 61-80	10.615	3.547.414	34.488	43.048	1.946
	Cc 81-07	20.221	11.727.496	102.394	165.599	4.546
	Cc 08-13	2.426	2.297.133	20.478	32.849	921
	Cc 14-17	164	125.382	1.036	1.557	28
	Cc 18-19	80	91.821	695	1.271	12

Modelado urbano de consumo energético en edificación basado en datos abiertos e IA para el diagnóstico del parque edificado europeo: el caso de España

Carlos Beltrán Velamazán

D1	Cc 20-24	152	179.208	1.477	2.311	29
	Bb <1940	590	347.626	2.876	4.040	148
	Bb 41-60	1.697	1.408.152	15.042	18.364	912
	Bb 61-80	12.424	16.629.193	172.413	232.808	8.081
	Bb 81-07	12.859	23.416.903	213.495	437.383	6.810
	Bb 08-13	1.565	3.623.275	34.235	70.211	909
	Bb 14-17	120	250.774	2.284	4.116	34
	Bb 18-19	91	257.278	2.158	4.749	17
	Bb 20-24	191	784.048	6.734	13.057	34
	Tt <1940	8.233	278.380	0	12.062	244
	Tt 41-60	4.470	137.265	0	4.837	259
	Tt 61-80	6.767	165.180	0	9.304	542
	Tt 81-07	15.821	336.932	0	25.275	951
	Tt 08-13	3.324	50.480	0	5.870	205
	Tt 14-17	942	12.619	0	1.252	42
	Tt 18-19	427	3.666	0	451	18
	Tt 20-24	612	2.910	0	642	59
	Uu <1940	197.180	29.026.537	197.180	238.049	9.556
	Uu 41-60	42.414	5.948.361	42.414	44.702	3.071
	Uu 61-80	64.393	9.375.631	64.393	67.716	6.692
	Uu 81-07	97.690	16.146.486	97.690	103.689	9.505
	Uu 08-13	13.630	2.453.753	13.630	14.373	1.674
	Uu 14-17	3.033	565.538	3.033	3.120	570
	Uu 18-19	1.262	230.875	1.262	1.277	405
	Uu 20-24	2.875	499.366	2.875	2.894	1.060
	Cc <1940	5.595	1.537.280	16.052	20.036	1.057
	Cc 41-60	3.536	1.039.915	12.770	14.841	856
	Cc 61-80	5.052	1.595.019	16.501	21.982	1.311
	Cc 81-07	6.737	4.904.917	44.107	66.443	3.015
	Cc 08-13	1.189	1.198.706	11.431	18.184	691
	Cc 14-17	98	65.031	530	769	34
	Cc 18-19	45	24.288	220	359	9
	Cc 20-24	106	68.261	656	1.071	25
	Bb <1940	2.242	1.209.190	11.585	15.909	943
	Bb 41-60	2.844	2.154.900	23.705	28.049	1.589
	Bb 61-80	10.092	12.983.122	132.176	182.035	6.726
	Bb 81-07	13.225	25.480.500	248.307	478.664	9.315
	Bb 08-13	1.752	4.698.201	49.682	99.831	1.376
	Bb 14-17	107	298.625	2.786	6.298	42
	Bb 18-19	71	193.066	1.707	4.317	14
	Bb 20-24	179	509.332	4.407	10.290	24
	Tt <1940	10.885	386.974	0	14.485	352

	Tt 41-60	2.185	66.620	0	2.505	148
	Tt 61-80	4.461	150.362	0	5.943	304
	Tt 81-07	9.262	250.359	0	15.284	792
	Tt 08-13	1.973	34.131	0	3.064	198
	Tt 14-17	505	8.615	0	550	61
	Tt 18-19	206	2.585	0	221	35
	Tt 20-24	330	8.463	0	390	55
D2	Uu <1940	274.261	35.424.144	274.261	305.883	17.956
	Uu 41-60	66.102	8.671.302	66.102	68.125	7.006
	Uu 61-80	133.251	18.491.168	133.251	138.005	19.679
	Uu 81-07	223.401	34.020.780	223.401	230.769	30.729
	Uu 08-13	26.827	4.560.687	26.827	27.323	3.929
	Uu 14-17	5.682	968.351	5.682	5.754	1.235
	Uu 18-19	2.702	472.688	2.702	2.737	946
	Uu 20-24	6.008	1.079.446	6.008	6.032	2.551
	Cc <1940	7.325	1.961.313	19.379	24.807	1.628
	Cc 41-60	5.069	1.410.448	15.219	18.126	1.626
	Cc 61-80	11.299	3.608.831	37.958	49.508	3.717
	Cc 81-07	17.207	12.627.145	114.342	179.032	7.764
	Cc 08-13	2.185	2.262.332	20.941	32.766	1.325
	Cc 14-17	214	161.881	1.222	2.008	83
	Cc 18-19	119	91.873	659	1.033	47
	Cc 20-24	348	287.891	2.110	3.314	131
	Bb <1940	4.564	2.244.681	21.228	28.944	2.369
	Bb 41-60	4.128	3.501.362	36.905	43.247	2.986
	Bb 61-80	20.587	31.322.190	320.437	437.397	15.715
	Bb 81-07	21.521	41.153.260	402.566	776.420	16.070
	Bb 08-13	2.632	6.180.385	65.061	140.276	2.081
	Bb 14-17	195	399.746	3.537	8.940	88
	Bb 18-19	121	265.632	2.134	5.540	37
	Bb 20-24	369	1.131.288	9.468	21.815	99
	Tt <1940	16.520	676.113	0	21.838	750
	Tt 41-60	3.879	138.806	0	4.606	387
	Tt 61-80	8.864	272.539	0	11.916	993
	Tt 81-07	17.142	298.451	0	31.844	1.961
	Tt 08-13	2.976	55.877	0	7.465	431
	Tt 14-17	706	7.855	0	1.597	71
	Tt 18-19	318	1.363	0	432	67
	Tt 20-24	554	15.696	0	764	115
D3	Uu <1940	325.407	46.100.944	325.407	374.635	13.958
	Uu 41-60	199.560	27.985.742	199.560	203.740	9.186
	Uu 61-80	264.699	41.158.385	264.699	273.580	11.484

Modelado urbano de consumo energético en edificación basado en datos abiertos e IA para el diagnóstico del parque edificado europeo: el caso de España

Carlos Beltrán Velamazán

	Uu 81-07	579.672	94.106.933	579.672	599.756	26.177
	Uu 08-13	65.819	11.815.748	65.819	68.282	3.303
	Uu 14-17	14.114	2.636.411	14.114	14.781	757
	Uu 18-19	9.189	1.748.989	9.189	9.292	551
	Uu 20-24	18.629	4.315.988	18.629	18.734	1.563
	Cc <1940	14.375	4.252.604	47.042	54.892	1.375
	Cc 41-60	12.330	3.688.653	41.684	47.174	1.690
	Cc 61-80	22.045	8.216.150	84.185	103.498	2.828
	Cc 81-07	37.649	32.959.016	280.450	423.488	9.063
	Cc 08-13	5.921	7.548.003	70.155	112.151	1.870
	Cc 14-17	495	863.227	5.985	8.233	56
	Cc 18-19	348	777.975	5.107	7.368	28
	Cc 20-24	757	1.747.158	12.256	17.792	50
	Bb <1940	11.784	14.328.446	168.577	198.956	6.472
	Bb 41-60	17.754	23.447.589	261.637	296.995	9.551
	Bb 61-80	62.359	116.320.781	1.292.622	1.619.129	33.579
	Bb 81-07	42.862	120.881.154	1.139.618	2.047.847	22.428
	Bb 08-13	6.009	22.619.652	226.484	432.765	3.044
	Bb 14-17	802	4.147.090	34.850	65.049	108
	Bb 18-19	590	3.067.362	24.848	48.063	29
	Bb 20-24	1.216	6.625.238	54.854	107.482	52
	Tt <1940	19.658	867.187	0	28.715	680
	Tt 41-60	9.333	363.119	0	11.804	493
	Tt 61-80	23.257	537.962	0	48.587	1.308
	Tt 81-07	48.668	613.406	0	162.303	2.666
	Tt 08-13	8.194	121.426	0	47.827	511
	Tt 14-17	1.981	22.694	0	3.447	105
	Tt 18-19	960	7.227	0	1.410	32
	Tt 20-24	1.609	15.337	0	5.068	91
E1	Uu <1940	437.860	57.432.551	437.860	473.419	12.831
	Uu 41-60	136.044	17.975.693	136.044	138.600	6.213
	Uu 61-80	150.882	20.794.028	150.882	154.888	7.065
	Uu 81-07	251.235	37.640.146	251.235	258.178	14.611
	Uu 08-13	38.289	6.121.132	38.289	39.151	3.329
	Uu 14-17	8.932	1.385.606	8.932	9.049	938
	Uu 18-19	3.250	518.008	3.250	3.274	473
	Uu 20-24	6.749	1.109.134	6.749	6.777	1.280
	Cc <1940	13.096	3.290.536	36.354	44.097	1.122
	Cc 41-60	7.805	2.168.868	25.698	30.415	1.276
	Cc 61-80	10.989	3.653.638	38.167	48.952	1.617
	Cc 81-07	20.094	14.012.304	131.446	191.634	6.388
	Cc 08-13	2.770	2.518.271	23.659	37.087	1.165

Cc 14-17	264	170.481	1.389	1.943	60
Cc 18-19	117	101.699	841	1.213	22
Cc 20-24	255	281.349	2.233	3.215	45
Bb <1940	4.089	1.978.963	19.278	27.008	1.325
Bb 41-60	4.482	3.229.837	36.381	46.624	2.294
Bb 61-80	16.147	22.245.373	228.600	326.363	9.630
Bb 81-07	17.542	33.976.903	323.889	646.256	10.786
Bb 08-13	2.091	5.123.897	51.533	104.285	1.454
Bb 14-17	180	357.492	3.133	6.617	65
Bb 18-19	94	222.483	1.832	3.911	27
Bb 20-24	268	799.041	6.591	13.259	53
Tt <1940	31.010	985.485	0	36.847	806
Tt 41-60	6.793	246.430	0	7.228	392
Tt 61-80	9.870	352.133	0	13.249	823
Tt 81-07	18.211	428.328	0	28.477	1.479
Tt 08-13	3.753	61.409	0	5.458	322
Tt 14-17	908	17.803	0	1.371	69
Tt 18-19	288	5.010	0	324	39
Tt 20-24	504	7.161	0	654	59

Tabla E.2. Consumo de energía primaria no renovable y emisiones de gases de efecto invernadero medias y medianas por tipo de edificio y zona climática. Uu – unifamiliar, Cc – Bloque plurifamiliar de 3 o menos plantas, Bb – Bloque plurifamiliar de 4 o más plantas, Tt – Edificios de uso no residencial y periodo de construcción. CEPNR: Consumo de energía primaria no renovable, GEI: Gases de efecto invernadero. Elaboración propia.

Zona climática	Tipo de edificio	CEPNR medio kWh/m ² a	CEPNR mediano kWh/m ² a	Emisiones GEI medias kgCO _{2eq} /m ² a	Emisiones GEI medianas kgCO _{2eq} /m ² a
Alpha3	Uu <1940	115,5	101,7	29,1	26,0
	Uu 41-60	116,9	103,9	29,6	26,4
	Uu 61-80	111,2	100,7	28,2	26,0
	Uu 81-07	107,5	97,2	27,1	24,7
	Uu 08-13	81,1	75,1	20,7	19,6
	Uu 14-17	72,7	54,3	18,4	13,5
	Uu 18-19	56,9	36,1	14,3	9,1
	Uu 20-24	50,4	33,7	12,9	8,8
	Cc <1940	123,8	116,3	31,9	30,1
	Cc 41-60	126,8	116,5	32,8	30,2
	Cc 61-80	131,7	123,3	33,8	31,8
	Cc 81-07	130,7	124,2	33,6	32,0

Modelado urbano de consumo energético en edificación basado en datos abiertos e IA para el diagnóstico del parque edificado europeo: el caso de España

Carlos Beltrán Velamazán

A2	Cc 08-13	115,9	110,0	29,9	28,4
	Cc 14-17	116,3	106,9	29,7	26,4
	Cc 18-19	98,2	86,8	24,6	21,8
	Cc 20-24	59,2	45,9	15,2	11,9
	Bb <1940	116,9	107,1	30,3	28,1
	Bb 41-60	127,1	118,4	32,9	30,7
	Bb 61-80	130,3	122,1	33,7	31,6
	Bb 81-07	135,6	127,9	34,9	33,0
	Bb 08-13	123,7	118,0	32,3	30,9
	Bb 14-17	93,7	88,6	24,5	23,5
	Bb 18-19	90,4	77,8	23,4	19,0
	Bb 20-24	58,6	39,7	15,1	10,3
	Tt <1940	143,7	112,1	37,0	29,2
	Tt 41-60	163,9	122,3	42,6	32,2
	Tt 61-80	195,9	187,5	50,0	47,8
	Tt 81-07	181,4	161,9	46,6	40,8
	Tt 08-13	178,4	142,6	46,8	36,9
	Tt 14-17	153,2	154,8	40,0	37,6
	Tt 18-19	153,0	139,9	39,8	37,1
	Tt 20-24	117,8	79,3	30,8	20,8
	Uu <1940	141,4	130,4	33,8	31,1
	Uu 41-60	146,4	134,6	34,5	30,9
	Uu 61-80	136,6	126,0	32,5	29,4
	Uu 81-07	113,9	104,1	27,2	24,6
	Uu 08-13	96,6	85,7	23,6	21,6
	Uu 14-17	86,4	58,0	20,6	14,4
	Uu 18-19	68,2	52,0	16,4	11,6
	Uu 20-24	55,7	46,6	13,3	12,0
	Cc <1940	149,5	142,2	36,0	33,9
	Cc 41-60	157,6	154,4	37,8	36,4
	Cc 61-80	152,7	139,5	36,6	33,2
	Cc 81-07	136,8	131,9	33,4	31,9
	Cc 08-13	125,4	118,2	31,3	29,3
	Cc 14-17	78,7	73,4	18,4	19,1
	Cc 18-19	55,0	37,4	14,1	9,0
	Cc 20-24	83,0	59,9	20,2	13,0
	Bb <1940	135,7	141,5	33,5	35,1
	Bb 41-60	158,6	161,9	38,6	40,6
	Bb 61-80	147,4	138,9	35,5	33,1
	Bb 81-07	147,7	144,6	36,3	35,4
	Bb 08-13	143,0	144,5	36,2	36,9
	Bb 14-17	85,3	85,3	21,1	21,1

A3	Bb 18-19	99,1	99,1	26,0	26,0
	Bb 20-24	86,2	52,1	18,9	11,2
	Tt <1940	176,4	155,8	44,3	38,1
	Tt 41-60	160,5	137,9	40,0	29,9
	Tt 61-80	169,9	140,1	43,1	34,9
	Tt 81-07	167,4	142,3	42,4	36,1
	Tt 08-13	176,2	148,7	45,9	38,7
	Tt 14-17	206,7	206,7	53,0	53,0
	Tt 18-19	139,3	92,4	36,1	24,5
	Tt 20-24	116,4	85,8	30,5	22,8
	Uu <1940	147,1	139,1	28,8	27,4
	Uu 41-60	161,9	154,5	31,8	30,4
	Uu 61-80	151,2	144,0	29,3	28,0
	Uu 81-07	131,4	125,6	25,3	24,2
	Uu 08-13	98,0	92,4	18,5	17,1
	Uu 14-17	60,7	46,3	11,1	8,3
	Uu 18-19	58,1	41,4	10,6	7,4
	Uu 20-24	50,6	34,2	9,3	6,1
	Cc <1940	155,0	141,2	30,2	28,3
	Cc 41-60	150,4	143,7	29,4	28,0
	Cc 61-80	147,9	141,6	28,6	27,6
	Cc 81-07	132,5	126,2	25,1	24,0
	Cc 08-13	113,9	109,1	21,3	20,5
	Cc 14-17	83,4	74,8	15,4	13,4
	Cc 18-19	84,2	73,3	15,4	12,6
	Cc 20-24	58,1	41,8	10,3	7,3
	Bb <1940	128,3	121,0	24,6	23,6
	Bb 41-60	141,1	134,5	27,6	26,7
	Bb 61-80	127,9	123,5	24,8	24,1
	Bb 81-07	120,7	113,4	22,7	21,4
	Bb 08-13	109,6	102,4	20,2	19,0
	Bb 14-17	86,3	86,9	15,5	15,4
	Bb 18-19	76,4	71,9	13,6	12,9
	Bb 20-24	62,4	48,4	10,9	8,2
	Tt <1940	150,4	138,4	27,5	25,1
	Tt 41-60	174,2	162,9	31,9	31,4
	Tt 61-80	171,0	141,7	31,0	26,4
	Tt 81-07	162,7	142,1	28,9	25,8
	Tt 08-13	151,4	124,8	26,6	22,9
	Tt 14-17	115,5	96,9	20,1	16,6
	Tt 18-19	109,4	87,0	19,2	14,1
	Tt 20-24	107,8	86,0	18,8	14,7

A4	Uu <1940	163,9	163,2	31,4	30,9
	Uu 41-60	168,0	167,7	32,6	32,9
	Uu 61-80	167,6	163,9	32,3	31,6
	Uu 81-07	136,7	136,5	25,9	25,8
	Uu 08-13	98,6	97,6	18,4	18,0
	Uu 14-17	67,7	55,4	12,7	9,8
	Uu 18-19	62,9	42,7	11,8	7,6
	Uu 20-24	53,1	34,8	9,9	6,2
	Cc <1940	146,6	142,6	27,8	26,9
	Cc 41-60	166,1	162,4	31,3	30,4
	Cc 61-80	158,2	153,6	30,5	29,4
	Cc 81-07	146,3	142,8	27,8	26,9
	Cc 08-13	120,1	118,3	22,3	21,9
	Cc 14-17	76,5	68,3	14,2	13,4
	Cc 18-19	42,8	34,1	7,9	6,4
	Cc 20-24	64,6	52,2	11,8	9,1
	Bb <1940	143,4	127,1	26,5	23,6
	Bb 41-60	157,5	153,4	30,5	30,0
	Bb 61-80	145,0	141,3	27,8	27,1
	Bb 81-07	128,8	125,9	24,1	23,5
	Bb 08-13	119,3	115,3	21,4	20,6
	Bb 14-17	120,5	104,2	21,8	20,0
	Bb 18-19	77,5	79,3	13,6	13,8
	Bb 20-24	60,4	42,6	10,6	7,6
	Tt <1940	171,8	154,4	30,8	29,2
	Tt 41-60	150,8	140,1	27,6	26,3
	Tt 61-80	170,8	144,0	30,6	25,7
	Tt 81-07	170,9	150,2	30,4	26,6
	Tt 08-13	150,6	128,5	26,5	23,3
	Tt 14-17	112,7	97,0	19,9	17,6
	Tt 18-19	116,6	97,0	20,7	16,4
	Tt 20-24	114,1	83,0	20,2	14,4
B3	Uu <1940	179,1	171,0	39,7	36,4
	Uu 41-60	189,9	180,7	41,2	38,0
	Uu 61-80	215,0	206,0	47,3	44,7
	Uu 81-07	185,3	178,4	40,7	38,0
	Uu 08-13	131,7	123,6	29,4	27,0
	Uu 14-17	85,1	68,5	19,2	15,0
	Uu 18-19	58,1	42,6	13,3	9,8
	Uu 20-24	50,2	36,0	11,5	8,0
	Cc <1940	181,8	174,8	42,4	38,7
	Cc 41-60	185,0	179,0	41,4	38,3

B4	Cc 61-80	201,8	195,5	45,8	43,0
	Cc 81-07	180,2	174,5	41,0	38,4
	Cc 08-13	142,9	138,6	33,6	30,5
	Cc 14-17	104,7	97,0	26,7	23,7
	Cc 18-19	95,5	82,9	22,2	18,1
	Cc 20-24	69,7	45,4	15,0	9,7
	Bb <1940	167,3	154,8	37,5	32,0
	Bb 41-60	165,6	158,0	35,3	32,0
	Bb 61-80	164,5	157,1	34,9	31,7
	Bb 81-07	152,1	144,5	32,1	29,0
	Bb 08-13	131,8	126,0	27,9	24,5
	Bb 14-17	104,5	100,7	23,4	18,9
	Bb 18-19	73,5	61,5	16,0	13,6
	Bb 20-24	64,3	43,2	14,0	9,0
	Tt <1940	191,2	172,9	44,2	36,0
	Tt 41-60	200,0	184,0	46,9	39,9
	Tt 61-80	216,8	197,0	52,6	45,0
	Tt 81-07	197,8	179,5	44,5	36,5
	Tt 08-13	173,1	154,7	36,7	30,0
	Tt 14-17	132,6	115,0	27,9	23,7
	Tt 18-19	139,6	115,8	32,1	23,4
	Tt 20-24	105,8	78,5	23,7	14,3
	Uu <1940	192,7	187,0	37,9	36,9
	Uu 41-60	189,5	185,1	37,2	36,1
	Uu 61-80	201,8	196,9	39,6	38,0
	Uu 81-07	180,2	177,7	35,0	34,0
	Uu 08-13	126,1	123,0	24,0	23,1
	Uu 14-17	88,7	74,0	16,7	13,2
	Uu 18-19	65,1	47,0	11,8	8,1
	Uu 20-24	56,9	39,4	10,3	7,0
	Cc <1940	185,1	182,0	35,7	34,9
	Cc 41-60	181,7	176,4	35,1	34,2
	Cc 61-80	182,4	176,5	35,2	34,0
	Cc 81-07	175,2	170,9	33,5	32,4
	Cc 08-13	134,8	131,5	25,3	24,5
	Cc 14-17	113,3	115,0	20,5	20,0
	Cc 18-19	75,5	54,6	13,2	9,3
	Cc 20-24	52,3	43,3	9,4	7,3
	Bb <1940	170,4	162,5	32,1	30,9
	Bb 41-60	174,7	170,0	33,6	32,8
	Bb 61-80	166,1	161,7	32,1	31,3
	Bb 81-07	153,5	148,8	29,1	28,1

Modelado urbano de consumo energético en edificación basado en datos abiertos e IA para el diagnóstico del parque edificado europeo: el caso de España

Carlos Beltrán Velamazán

C1	Bb 08-13	134,1	129,8	25,0	23,9
	Bb 14-17	97,3	91,4	17,4	16,1
	Bb 18-19	71,5	65,7	12,6	11,8
	Bb 20-24	57,7	41,0	10,1	7,0
	Tt <1940	178,5	160,6	32,7	29,0
	Tt 41-60	181,3	163,6	33,3	30,0
	Tt 61-80	186,1	170,6	34,4	31,3
	Tt 81-07	185,6	169,0	33,9	30,0
	Tt 08-13	159,7	138,0	28,1	24,4
	Tt 14-17	140,6	125,0	24,2	21,2
	Tt 18-19	113,6	89,8	19,1	15,2
	Tt 20-24	98,9	74,6	17,3	12,9
	Uu <1940	229,7	228,2	49,4	48,6
	Uu 41-60	262,3	260,3	57,3	55,6
	Uu 61-80	258,4	255,4	57,4	55,0
	Uu 81-07	217,2	213,6	48,8	47,8
	Uu 08-13	158,3	151,4	35,1	32,5
	Uu 14-17	96,6	66,1	19,5	12,5
	Uu 18-19	62,7	45,0	12,2	8,3
	Uu 20-24	53,7	32,9	10,0	5,8
	Cc <1940	229,8	221,6	49,0	46,3
	Cc 41-60	241,9	232,8	52,8	49,4
	Cc 61-80	239,6	231,4	50,3	48,5
	Cc 81-07	203,3	198,7	42,7	41,0
	Cc 08-13	167,0	160,3	34,5	32,7
	Cc 14-17	120,0	113,8	25,0	23,7
	Cc 18-19	149,6	126,4	29,9	26,8
	Cc 20-24	61,9	34,5	11,6	6,7
	Bb <1940	201,7	193,4	41,9	39,0
	Bb 41-60	207,5	201,8	43,1	41,1
	Bb 61-80	199,8	193,3	41,3	39,6
	Bb 81-07	184,2	177,2	37,2	35,6
	Bb 08-13	145,7	137,5	28,8	27,2
	Bb 14-17	116,5	100,5	23,1	21,0
	Bb 18-19	75,4	49,5	14,2	9,0
	Bb 20-24	92,5	64,0	17,9	12,5
	Tt <1940	226,8	216,8	48,0	44,6
	Tt 41-60	239,4	222,2	48,8	46,0
	Tt 61-80	221,2	213,6	46,6	43,5
	Tt 81-07	224,8	208,8	46,0	41,4
	Tt 08-13	191,6	168,3	37,1	31,7
	Tt 14-17	175,9	154,1	33,7	27,6

C2	Tt 18-19	139,1	127,9	24,5	21,2
	Tt 20-24	106,4	91,5	18,6	15,7
	Uu <1940	213,3	205,1	44,4	42,3
	Uu 41-60	236,5	230,7	49,6	48,0
	Uu 61-80	256,0	251,2	54,9	53,0
	Uu 81-07	218,8	214,2	47,7	45,9
	Uu 08-13	154,1	144,4	32,3	29,6
	Uu 14-17	96,7	61,8	20,0	12,7
	Uu 18-19	72,5	47,9	14,3	9,1
	Uu 20-24	61,6	36,8	11,8	6,6
	Cc <1940	208,4	201,3	42,7	41,3
	Cc 41-60	217,9	212,6	44,8	43,4
	Cc 61-80	216,0	209,1	44,7	43,1
	Cc 81-07	193,3	188,1	40,1	38,7
	Cc 08-13	149,4	144,3	30,5	28,9
	Cc 14-17	99,4	78,7	20,1	15,9
	Cc 18-19	76,0	55,1	15,3	10,5
	Cc 20-24	55,6	39,0	10,4	7,0
	Bb <1940	191,8	185,7	39,3	38,0
	Bb 41-60	201,8	197,0	41,7	40,7
	Bb 61-80	199,8	194,8	41,4	40,3
	Bb 81-07	177,8	173,2	36,4	35,4
	Bb 08-13	141,1	135,4	28,2	26,9
	Bb 14-17	103,6	91,0	19,8	17,4
	Bb 18-19	73,0	50,4	13,7	8,9
	Bb 20-24	53,4	36,3	9,8	6,5
	Tt <1940	207,0	191,9	41,6	37,1
	Tt 41-60	206,2	189,8	41,3	36,8
	Tt 61-80	212,3	193,5	41,8	37,8
	Tt 81-07	212,7	194,6	41,6	37,0
	Tt 08-13	197,5	171,9	37,8	32,5
	Tt 14-17	177,3	162,9	33,6	28,6
	Tt 18-19	145,6	114,6	25,4	19,5
	Tt 20-24	105,9	81,1	19,8	14,1
C3	Uu <1940	204,8	194,2	41,6	39,0
	Uu 41-60	215,0	204,8	43,3	40,9
	Uu 61-80	222,1	214,0	45,1	43,0
	Uu 81-07	188,3	182,0	38,6	36,5
	Uu 08-13	140,0	133,0	27,9	26,0
	Uu 14-17	94,4	75,7	18,4	14,0
	Uu 18-19	72,4	53,4	13,7	10,0
	Uu 20-24	51,7	38,0	9,5	6,7

Modelado urbano de consumo energético en edificación basado en datos abiertos e IA para el diagnóstico del parque edificado europeo: el caso de España

Carlos Beltrán Velamazán

C4	Cc <1940	196,0	183,0	39,4	37,0
	Cc 41-60	194,8	186,0	38,3	36,4
	Cc 61-80	197,2	188,7	38,8	37,0
	Cc 81-07	168,9	163,9	33,6	32,0
	Cc 08-13	142,7	137,9	28,0	26,3
	Cc 14-17	114,5	100,8	22,3	19,7
	Cc 18-19	67,5	60,3	12,6	11,0
	Cc 20-24	53,1	41,5	9,6	7,0
	Bb <1940	195,4	186,3	38,3	36,6
	Bb 41-60	194,5	190,0	38,2	36,7
	Bb 61-80	172,3	166,1	34,1	32,9
	Bb 81-07	154,6	147,7	30,1	28,7
	Bb 08-13	135,6	130,2	25,7	24,4
	Bb 14-17	108,6	99,7	20,4	18,2
	Bb 18-19	95,2	69,0	17,2	12,0
	Bb 20-24	70,9	51,1	12,8	9,0
	Tt <1940	204,8	187,0	40,4	36,9
	Tt 41-60	202,7	179,6	38,9	34,0
	Tt 61-80	196,1	177,0	37,8	33,0
	Tt 81-07	196,6	179,0	36,8	33,0
	Tt 08-13	177,2	164,0	32,5	29,0
	Tt 14-17	143,6	128,1	24,9	22,3
	Tt 18-19	98,6	75,0	16,7	13,0
	Tt 20-24	90,0	68,0	16,2	11,0
	Uu <1940	234,0	225,8	47,0	45,6
	Uu 41-60	235,4	230,0	47,0	45,9
	Uu 61-80	239,5	233,0	48,0	46,6
	Uu 81-07	198,9	195,9	40,0	38,7
	Uu 08-13	142,1	136,0	27,7	26,1
	Uu 14-17	136,6	116,1	26,4	21,7
	Uu 18-19	90,8	66,0	17,3	12,4
	Uu 20-24	69,0	48,5	13,0	8,8
	Cc <1940	218,7	207,1	42,8	41,3
	Cc 41-60	224,7	220,3	44,0	43,0
	Cc 61-80	217,8	210,2	42,5	41,2
	Cc 81-07	196,6	194,3	38,0	37,3
	Cc 08-13	164,5	161,5	31,3	30,7
	Cc 14-17	99,3	94,8	18,6	18,0
	Cc 18-19	93,3	77,9	17,2	14,4
	Cc 20-24	90,0	59,0	16,8	11,4
	Bb <1940	203,4	201,2	38,8	38,6
	Bb 41-60	203,2	196,8	39,3	38,2

D1	Bb 61-80	194,9	187,3	37,9	36,2
	Bb 81-07	188,1	182,7	36,2	35,5
	Bb 08-13	156,7	152,4	29,8	29,2
	Bb 14-17	123,6	113,4	23,9	22,8
	Bb 18-19	87,3	71,5	15,6	12,4
	Bb 20-24	64,2	48,3	11,8	9,4
	Tt <1940	211,2	200,4	39,9	36,7
	Tt 41-60	214,7	208,2	41,5	41,4
	Tt 61-80	209,7	201,7	41,5	40,2
	Tt 81-07	213,1	198,8	40,3	37,8
	Tt 08-13	194,3	183,9	35,6	34,4
	Tt 14-17	189,1	159,3	32,9	28,4
	Tt 18-19	158,6	160,9	28,6	28,0
	Tt 20-24	125,5	91,3	22,1	15,5
	Uu <1940	267,7	262,6	60,1	57,1
	Uu 41-60	300,9	296,8	68,4	65,8
	Uu 61-80	302,3	299,9	69,4	67,0
	Uu 81-07	254,9	250,9	58,8	57,0
	Uu 08-13	189,1	176,9	41,7	39,0
	Uu 14-17	113,0	85,4	23,9	17,2
	Uu 18-19	80,8	55,5	16,3	10,0
	Uu 20-24	69,1	42,1	13,9	7,5
	Cc <1940	267,6	255,2	58,6	53,2
	Cc 41-60	291,6	279,7	64,9	60,0
	Cc 61-80	276,4	271,4	59,8	56,6
	Cc 81-07	230,3	220,0	49,9	46,9
	Cc 08-13	180,9	167,1	38,4	35,2
	Cc 14-17	122,2	100,0	24,9	20,2
	Cc 18-19	106,3	81,6	19,6	13,8
	Cc 20-24	89,8	67,5	17,1	12,4
	Bb <1940	251,4	237,0	53,9	50,0
	Bb 41-60	282,6	273,5	61,4	57,5
	Bb 61-80	252,5	242,3	54,9	52,1
	Bb 81-07	213,6	203,8	45,5	43,0
	Bb 08-13	161,4	151,9	33,4	31,2
	Bb 14-17	142,1	108,3	28,9	22,5
	Bb 18-19	87,6	64,0	17,2	13,4
	Bb 20-24	99,0	43,3	19,1	8,9
	Tt <1940	253,6	244,6	53,6	49,5
	Tt 41-60	253,4	245,0	54,8	53,3
	Tt 61-80	247,8	234,8	53,6	48,6
	Tt 81-07	259,9	243,0	54,4	49,4

Modelado urbano de consumo energético en edificación basado en datos abiertos e IA para el diagnóstico del parque edificado europeo: el caso de España

Carlos Beltrán Velamazán

	Tt 08-13	219,3	187,2	42,9	36,9
	Tt 14-17	172,0	146,5	32,0	29,4
	Tt 18-19	164,2	128,1	31,8	26,0
	Tt 20-24	131,2	100,3	22,6	14,7
D2	Uu <1940	260,2	249,8	55,8	52,8
	Uu 41-60	293,7	290,0	63,7	61,1
	Uu 61-80	295,5	290,4	65,2	62,7
	Uu 81-07	250,6	246,0	56,1	54,3
	Uu 08-13	181,0	173,0	39,2	37,7
	Uu 14-17	107,6	81,0	22,2	15,8
	Uu 18-19	85,4	59,3	17,3	11,5
	Uu 20-24	67,3	43,0	12,9	7,6
	Cc <1940	253,1	243,6	52,3	50,0
	Cc 41-60	271,5	265,8	56,2	55,0
	Cc 61-80	270,0	262,0	56,6	54,0
	Cc 81-07	228,3	222,1	48,2	46,2
	Cc 08-13	179,5	173,0	37,2	35,4
	Cc 14-17	121,7	112,1	24,2	22,0
	Cc 18-19	91,9	62,9	18,6	12,1
	Cc 20-24	62,1	42,6	12,2	8,2
	Bb <1940	245,5	238,0	49,8	47,6
	Bb 41-60	263,1	257,6	54,3	53,0
	Bb 61-80	248,7	243,7	52,1	50,9
	Bb 81-07	213,5	206,8	44,6	43,0
	Bb 08-13	166,5	160,7	33,9	32,9
	Bb 14-17	113,4	93,5	22,2	19,2
	Bb 18-19	82,7	55,0	15,7	11,4
	Bb 20-24	62,8	39,6	11,7	7,3
	Tt <1940	250,3	231,7	52,2	47,0
	Tt 41-60	251,8	240,1	52,8	50,0
	Tt 61-80	252,6	241,0	52,6	49,0
	Tt 81-07	251,1	235,0	50,9	46,1
	Tt 08-13	208,1	185,0	40,9	35,3
	Tt 14-17	182,8	158,0	34,2	28,0
	Tt 18-19	131,6	102,8	23,2	19,3
	Tt 20-24	129,6	108,0	24,4	18,1
D3	Uu <1940	279,4	270,2	59,7	56,6
	Uu 41-60	288,4	281,6	62,1	58,9
	Uu 61-80	290,2	285,0	63,7	61,0
	Uu 81-07	225,3	220,0	49,1	46,7
	Uu 08-13	164,0	156,4	34,4	32,0
	Uu 14-17	108,7	78,6	22,6	15,5

	Uu 18-19	99,8	65,6	20,2	12,3
	Uu 20-24	73,6	47,8	14,3	8,8
	Cc <1940	280,2	279,2	62,1	60,2
	Cc 41-60	279,5	278,8	61,4	59,5
	Cc 61-80	257,3	254,0	55,9	54,4
	Cc 81-07	215,7	210,7	46,1	43,7
	Cc 08-13	180,3	175,7	37,3	35,6
	Cc 14-17	129,5	117,0	26,2	22,1
	Cc 18-19	94,7	67,9	19,1	13,7
	Cc 20-24	82,3	58,7	16,1	9,9
	Bb <1940	232,0	224,5	53,4	50,3
	Bb 41-60	233,2	229,9	52,1	50,3
	Bb 61-80	227,4	225,8	50,4	49,6
	Bb 81-07	197,3	191,6	42,4	40,4
	Bb 08-13	161,6	153,8	33,9	31,9
	Bb 14-17	123,5	110,0	25,8	23,0
	Bb 18-19	116,1	96,1	23,6	19,7
	Bb 20-24	78,3	39,1	14,4	7,6
	Tt <1940	264,2	244,0	56,3	51,7
	Tt 41-60	265,5	254,0	56,9	53,6
	Tt 61-80	270,4	261,9	58,8	54,6
	Tt 81-07	262,6	250,6	57,3	53,0
	Tt 08-13	233,3	211,5	48,7	42,5
	Tt 14-17	182,6	161,8	37,3	28,6
	Tt 18-19	166,3	157,9	28,8	27,1
	Tt 20-24	143,0	97,3	27,2	17,4
	Uu <1940	315,8	314,9	71,6	68,0
	Uu 41-60	339,4	337,2	80,1	74,7
	Uu 61-80	342,5	347,8	80,7	78,0
	Uu 81-07	286,7	284,0	66,8	65,0
	Uu 08-13	226,0	221,6	50,4	48,0
	Uu 14-17	137,7	111,0	29,0	23,0
	Uu 18-19	103,9	78,0	22,9	15,0
	Uu 20-24	93,0	56,0	19,5	10,0
	Cc <1940	322,1	312,0	72,4	68,0
	Cc 41-60	336,9	335,0	75,2	72,0
	Cc 61-80	323,9	316,0	72,9	69,0
	Cc 81-07	265,8	259,1	59,0	56,1
	Cc 08-13	210,6	203,6	45,3	43,2
	Cc 14-17	159,7	139,5	34,4	29,9
	Cc 18-19	95,9	87,2	20,3	18,2
	Cc 20-24	80,6	64,0	16,1	12,6

E1

Modelado urbano de consumo energético en edificación basado en datos abiertos e IA para el diagnóstico del parque edificado europeo: el caso de España

Carlos Beltrán Velamazán

Bb <1940	295,7	289,1	62,8	60,6
Bb 41-60	318,5	313,0	69,1	66,6
Bb 61-80	297,8	292,7	65,7	63,8
Bb 81-07	249,9	242,4	54,9	52,3
Bb 08-13	189,6	180,0	39,6	37,9
Bb 14-17	131,2	110,0	26,9	23,3
Bb 18-19	77,6	62,6	15,8	13,0
Bb 20-24	82,5	60,2	16,5	11,6
Tt <1940	300,7	294,5	65,8	64,0
Tt 41-60	309,6	303,9	69,3	66,0
Tt 61-80	303,1	292,0	68,2	65,0
Tt 81-07	296,1	279,0	64,0	59,2
Tt 08-13	266,3	247,5	56,0	50,1
Tt 14-17	179,7	152,0	36,2	29,4
Tt 18-19	173,9	136,0	32,5	23,0
Tt 20-24	142,9	110,5	28,4	19,0

Referencias

Referencias

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis*; Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom, 2023. ISBN 9781009157896.
- [2] Secretaría General del Consejo Pacto Verde Europeo. Disponible en: <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/> (consultado el 19 de noviembre de 2024).
- [3] International Energy Agency. *2018 Global Status Report*; International Energy Agency: Paris, France, 2018.
- [4] European Commission - Department: Energy. *Energy Efficiency in Buildings*; European Commission: Brussels, Belgium, 2020.
- [5] Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. *Actualización 2020 de la estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España*; Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana: Madrid, España, 2020.
- [6] Royal Institution of Chartered Surveyors. *Energy Efficiency of the Building Stock in the EU*. Disponible en: <https://www.rics.org/news-insights/energy-efficiency-of-the-building-stock-inthe-eu> (consultado el 20 de enero de 2025).
- [7] European Commission. *Questions and Answers on the Renovation Wave*; European Commission: Brussels, Belgium, 2020.
- [8] Buildings Performance Institute Europe. *97% of Buildings in the EU Need to Be Upgraded*; Buildings Performance Institute Europe: Brussels, Belgium, 2017.
- [9] Beltrán-Velamazán, C.; Gómez-Gil, M.; López-Mesa, B. Analysis of Institutional Frameworks of Indicators to Measure the Effectiveness of Building Renovation Policy and Decarbonization Progress in Europe. En *Assessing Progress in Decarbonizing Spain's Building Stock: Indicators and Data Availability*; López-Mesa, B., Oregi, X., Eds.; Springer Nature Switzerland: Cham, Switzerland, 2024; pp. 17–55. ISBN 978-3-031-51829-4.
- [10] Steuwer, S.; Volt, J.; Dorizas, V.; Jossen, Q.; Pestiaux, J.; Sonvilla, P.; Velten, E.; Davis, M.; Hirschnitz-Garbers, M.; et al. *Lessons Learned to Inform Integrated Approaches for the Renovation and Modernisation of the Built Environment – Final Report*; Publications Office of the European Union: Luxembourg, Luxembourg, 2021. ISBN 978-92-76-36146-6; doi: 10.2833/771121.
- [11] López-Mesa, B.; Beltrán-Velamazán, C.; Gómez-Gil, M.; Monzón-Chavarrias, M.; Espinosa-Fernández, A. New Approaches to Generate Data to Measure the Progress of Decarbonization of the Building Stock in Europe and Spain. En *Assessing Progress in Decarbonizing Spain's Building Stock: Indicators and Data Availability*; López-Mesa, B., Oregi, X., Eds.; Springer Nature Switzerland: Cham, Switzerland, 2024; pp. 317–346. ISBN 978-3-031-51829-4.

- [12] Rebellius, M. *How Digital Technologies Will Help the EU Meet Its Energy Efficiency Targets*. Disponible en: <https://www.weforum.org/stories/2023/11/digital-technologies-eu-energyefficiency-directive/> (consultado el 23 de noviembre de 2024).
- [13] Marín, J.L. *El Papel de Los Datos Abiertos y La Inteligencia Artificial En El Pacto Verde Europeo*. Disponible en: <https://datos.gob.es/es/blog/el-papel-de-los-datos-abiertos-y-la-inteligenciaartificial-en-el-pacto-verde-europeo> (consultado el 23 de noviembre de 2024).
- [14] European Commission. *EU Biodiversity Strategy for 2030*; EUR-Lex: Brussels, Belgium, 2020.
- [15] Halleux, V. *Nuevo Plan de Acción Para La Economía Circular*. Disponible en: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2021/679066/EPRS_ATA\(2021\)679066_ES.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2021/679066/EPRS_ATA(2021)679066_ES.pdf) (consultado el 23 de noviembre de 2024).
- [16] European Commission - Directorate-General for Communication. *Questions and Answers: A New Circular Economy Action Plan for a Cleaner and More Competitive Europe*. Disponible en: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_20_419 (consultado el 23 de noviembre de 2024)).
- [17] Dirección General de Gobernanza Pública del Gobierno de España. *Datos Abiertos y Reutilización de La Información Del Sector Público*. Disponible en: https://administracion.gob.es/pag_Home/espanaAdmon/Transparencia-y-datos-abiertos-2/datos_abiertos.html (consultado el 19 de octubre de 2024).
- [18] European Commission - Directorate-General for Communications Networks Content and Technology. *Common European Data Spaces*. Disponible en: <https://digitalstrategy.ec.europa.eu/en/policies/data-spaces> (consultado el 23 de noviembre de 2024).
- [19] European Parliament; Council of the European Union. *Directive 2003/98/EC of the European Parliament and of the Council of 17 November 2003 on the Re-Use of Public Sector Information*; Official Journal of the European Union: Brussels, Belgium, 2003; pp. 90–96.
- [20] European Parliament; Council of the European Union. *Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 Establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE)*; Official Journal of the European Union: Brussels, Belgium, 2007; pp. 1–18.
- [21] European Parliament; Council of the European Union. *Regulation (EU) 2023/2854 of the European Parliament and of the Council of 13 December 2023 on Harmonised Rules on Fair Access to and Use of Data and Amending Regulation (EU) 2017/2394 and Directive (EU) 2020/1828 (Data Act)*; Official Journal of the European Union: Brussels, Belgium, 2023; pp. 1–71.
- [22] European Commission: Directorate-General for Digital Services. *New European Interoperability Framework – Promoting Seamless Services and Data Flows for European Public Administrations*; Publications Office of the European Union: Luxembourg, Luxembourg, 2017. ISBN 978-92-79-63756-8; doi:10.2799/78681.
- [23] Reinhart, C.F.; Cerezo Davila, C. Urban Building Energy Modeling – A Review of a Nascent Field. *Build Environ* **2016**, *97*, 196–202, doi:10.1016/J.BUILDENV.2015.12.001.

-
- [24] Hong, T.; Chen, Y.; Luo, X.; Luo, N.; Lee, S.H. Ten Questions on Urban Building Energy Modeling. *Build Environ* **2020**, *168*, 106508, doi:10.1016/J.BUILDENV.2019.106508.
 - [25] Berres, A.S.; Bass, B.C.; Adams, M.B.; Garrison, E.; New, J.R. A Data-Driven Approach to Nation-Scale Building Energy Modeling. En *Proceedings - 2021 IEEE International Conference on Big Data*; Institute of Electrical and Electronics Engineers: Orlando, USA, 2021; pp. 1558–1565.
 - [26] Awuzie, B.; Ngowi, A.; Aghimien, D. Towards Built Environment Decarbonisation: A Review of the Role of Artificial Intelligence in Improving Energy and Materials' Circularity Performance. *Energy Build* **2024**, *319*, 114491, doi:10.1016/j.enbuild.2024.114491.
 - [27] Elsevier. *Scopus Quick Reference Guide*. Disponible en: https://supportcontent.elsevier.com/RightNow%20Next%20Gen/Scopus/Files/Scopus_User_Guide.pdf (consultado el 23 de noviembre de 2024).
 - [28] Buffat, R.; Froemelt, A.; Heeren, N.; Raubal, M.; Hellweg, S. Big Data GIS Analysis for Novel Approaches in Building Stock Modelling. *Appl Energy* **2017**, *208*, 277–290, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.041>.
 - [29] Pei, W.; Biljecki, F.; Stouffs, R. Techniques and Tools for Integrating Building Material Stock Analysis and Life Cycle Assessment at the Urban Scale: A Systematic Literature Review. *Build Environ* **2024**, *262*, 111741, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111741>.
 - [30] Gómez-Gil, M.; Arbulu, M.; Hernández-Minguillón, R.J.; López-Mesa, B. On the Availability and Quality of Data in Spain for the Development of Indicators to Measure Building Renovation Policies Effectiveness and the Decarbonization of the Building Stock. En *Assessing Progress in Decarbonizing Spain's Building Stock: Indicators and Data Availability*; López-Mesa, B., Oregi, X., Eds.; Springer Nature Switzerland: Cham, Switzerland, 2024; pp. 291–316 ISBN 978-3-031-51829-4.
 - [31] Staniaszek, D.; Kockat, J.; Roscini, A.V. *A Review of EU Member States' 2020 Long-Term Renovation Strategies*; Buildings Performance Institute Europe: Brussels, Belgium, 2020.
 - [32] Gómez-Gil, M.; Espinosa-Fernández, A.; López-Mesa, B. Contribution of New Digital Technologies to the Digital Building Logbook. *Buildings* **2022**, *12*, doi:10.3390/buildings12122129.
 - [33] Bass, B.; New, J.; Clinton, N.; Adams, M.; Copeland, B.; Amoo, C. How Close Are Urban Scale Building Simulations to Measured Data? Examining Bias Derived from Building Metadata in Urban Building Energy Modeling. *Appl Energy* **2022**, *327*, 120049, doi:10.1016/J.APENERGY.2022.120049.
 - [34] Apostolopoulou, A.; Boyd, D.; Carlos, C.; Cavazzi, S.; Wilson, R.; Jimenez-Bescos, C. Optimization of Computational Time for Urban Building Energy Modelling, through Generalizing the Building Footprint. A Case Study in London, UK. En *Proceedings of the 31st GISRUK Conference 2023*; Glasgow, United Kingdom, April 19 2023.
 - [35] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. *Estrategia a Largo Plazo Para Una Economía Española Moderna, Competitiva y Climáticamente Neutra En 2050*; Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico: Madrid, España, 2020.

- [36] European Commission - Directorate-General for Mobility and Transport. *European Green Deal: Commission Proposes Transformation of EU Economy and Society to Meet Climate Ambitions*; European Commission: Brussels, Belgium, 2021.
- [37] United Nations General Assembly. *Resolution Adopted by the General Assembly on 25 September 2015*; United Nations, 2015.
- [38] General Secretariat of the Council. *Fit for 55*. Disponible en: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/fit-for-55/> (consultado el 18 de noviembre de 2024).
- [39] United Nations General Assembly. *Declaración y El Plan de Acción de Estocolmo Para El Medio Humano*; United Nations: Stockholm, Sweden, 1972.
- [40] Schramm, L. The Neglected Integration Crisis: France, Germany and Lacking European Cooperation During the 1973/1974 Oil Shock. *JCMS: Journal of Common Market Studies* **2024**, 62, 583–602, doi:10.1111/jcms.13518.
- [41] Bourguignon, A. *Environment Action Programme*; European Parliamentary Research Service: Brussels, Belgium, 2018.
- [42] European Parliament. *Environment Policy: General Principles and Basic Framework*. Disponible en: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/en/sheet/71/environment-policy-general-principlesand-basic-framework> (consultado el 18 de noviembre de 2024).
- [43] García Lupiola, A. Cinco décadas de programas europeos sobre medio ambiente. Un repaso ante la llegada del Octavo programa. *Revista Catalana de Dret Ambiental* **2021**, 12, doi:10.17345/rcda3129.
- [44] The twelve Member States. *Single European Act*; Council of the European Communities: Luxembourg, Luxembourg, 1986; pp. 1–28.
- [45] Council of the European Communities. *Council Directive 89/106/EEC of 21 December 1988 on the Approximation of Laws, Regulations and Administrative Provisions of the Member States Relating to Construction Products*; Official Journal of the European Communities: Brussels, Belgium, 1988; pp. 12–26.
- [46] European Parliament; Council of the European Union. *Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the Energy Performance of Buildings*; Official Journal of the European Communities: Brussels, Belgium, 2002; pp. 65–71.
- [47] European Parliament; Council of the European Union. *Directive 2006/32/EC of the European Parliament and of the Council of 5 April 2006 on Energy End-Use Efficiency and Energy Services and Repealing Council Directive 93/76/EEC*; Official Journal of the European Union: Brussels, Belgium, 2006; pp. 64–85.
- [48] European Parliament; Council of the European Union. *Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings (Recast)*; Official Journal of the European Union: Brussels, Belgium, 2010; pp. 13–35.
- [49] European Parliament; Council of the European Union. *Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on Energy Efficiency, Amending Directives*

-
- 2009/125/EC and 2010/30/EU and Repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC; Official Journal of the European Union: Brussels, Belgium, 2012; pp. 1–56.
- [50] Ministerio de Fomento. *Estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España en desarrollo del Artículo 4 de la Directiva 2012/27/UE*; Ministerio de Fomento: Madrid, España, 2014.
- [51] European Parliament; Council of the European Union. *Directive (EU) 2018/2002 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 Amending Directive 2012/27/EU on Energy Efficiency*; Official Journal of the European Union: Brussels, Belgium, 2018; pp. 210–230.
- [52] European Parliament; Council of the European Union. *Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the Governance of the Energy Union and Climate Action*; Official Journal of the European Union: Brussels, Belgium, 2018; pp. 1–77.
- [53] European Parliament; Council of the European Union. *Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 Amending Directive 2010/31/EU on the Energy Performance of Buildings and Directive 2012/27/EU on Energy Efficiency*; Official Journal of the European Union: Brussels, Belgium, 2018; pp. 75–91.
- [54] European Commission. *Commission Recommendation (EU) 2019/786 of 8 May 2019 on Building Renovation*. Official Journal of the European Union: Brussels, Belgium, 2019; pp. 34–79.
- [55] European Environment Agency. *Trends and Projections in Europe 2021*; European Environment Agency: Luxembourg, Luxembourg, 2021. ISBN: 978-92-9480-392-4.
- [56] European Parliament; Council of the European Union. *Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 Establishing the Framework for Achieving Climate Neutrality and Amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ('European Climate Law')*; Official Journal of the European Union: Brussels, Belgium, 2021; pp. 1–17.
- [57] European Commission. *Commission Recommendation (EU) 2021/1749 of 28 September 2021 on Energy Efficiency First: From Principles to Practice — Guidelines and Examples for Its Implementation in Decision-Making in the Energy Sector and Beyond*; Official Journal of the European Union: Brussels, Belgium, 2021; pp. 9–59.
- [58] European Commission. *A Renovation Wave for Europe - Greening Our Buildings, Creating Jobs, Improving Lives*; Official Journal of the European Union: Brussels, Belgium, 2020.
- [59] European Parliament; Council of the European Union. *Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on Energy Efficiency and Amending Regulation (EU) 2023/955 (Recast)*; Official Journal of the European Union: Brussels, Belgium, 2023; pp. 1–111.
- [60] European Commission. *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the Energy Performance of Buildings (Recast) (Text with EEA Relevance) {SEC(2021) 430 Final} - {SWD(2021) 453 Final} - {SWD(2021) 454 Final}*; EUR-Lex, 2021.

- [61] European Commission. *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the Energy Performance of Buildings (Recast) General Approach*; EUR-Lex, 2022.
- [62] European Parliament. *Amendments Adopted by the European Parliament on 14 March 2023 on the Proposal for a directive of the European Parliament and of the Council on the Energy Performance of buildings (Recast) (COM(2021)0802 – C9-0469/2021 – 2021/0426(COD))*; EUR-Lex, 2023.
- [63] European Parliament; Council of the European Union. *Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the Energy Performance of Buildings (Recast)*; Official Journal of the European Union: Brussels, Belgium, 2024; pp. 1–68.
- [64] Government of France - Ministry of the Environment, Energy and the Sea; Government of France - Ministry of Housing and Sustainable Accommodation. *Long-Term Strategy of France for Mobilising Investment in the Renovation of the National Stock of Residential and Commercial Buildings, Both Public and Private*; Ministry of the Environment, Energy and the Sea, Paris, France, 2020.
- [65] Government of the Republic of Lithuania. *Long-Term Renovation Strategy of Lithuania*; Government of the Republic of Lithuania: Vilna, Lithuania, 2021
- [66] Bulgarian Government. *Long-Term National Strategy to Support the Renovation of the National Building Stock of Residential and Non-Residential Buildings by 2050*; Bulgarian Government: Sofia, Bulgaria, 2020.
- [67] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030*; Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid, España, 2020.
- [68] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima Actualización 2023-2030*; Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid, España, 2024.
- [69] Beltrán-Velamazán, C.; Gómez-Gil, M.; López-Mesa, B.; Monzón-Chavarriás, M.; González González, F. Comparison of Frameworks for the Assessment of Decarbonisation of European National Building Stocks. *Environmental and Climate Technologies* **2023**, *27*, <https://doi.org/10.2478/rtuect-2023-0037>.
- [70] Filippidou, F.; Jiménez, J.P. *Achieving the Cost-Effective Energy Transformation of Europe's Buildings*; European Commission: Brussels, Belgium, 2019. doi:10.2760/278207.
- [71] OECD Urban Studies. *Decarbonising Buildings in Cities and Regions*; OECD Publishing: Paris, France, 2022. ISBN 9789264639683.
- [72] Economidou, M.; Todeschi, V.; Bertoldi, P. *Accelerating Energy Renovation Investments in Buildings*; Publications Office of the European Union: Luxembourg, Luxembourg, 2019. ISBN 978-92-76- 12195-4.
- [73] Dodd, N.; Cordella, M.; Traverso, M.; Donatello, S. *Level(s) -A Common EU Framework of Core Sustainability Indicators for Office and Residential Buildings Part 3: How to Make Performance Assessments Using Level(s) (Draft Beta v1.0)*; 2017.

-
- [74] Hermelink, A.; Schimschar, S.; Offermann, M.; John, A.; Reiser, M.; Pohl, A.; Grözing, J.; Esser, A.; Dunne, A.; Meeusen, T.; et al. *Comprehensive Study of Building Energy Renovation Activities and the Uptake of Nearly Zero-Energy Buildings in the EU*; European Commission: Brussels, Belgium, 2019.
 - [75] Vitali Roscini, A.; Rapf, O.; Kockat, J. *On the Way to a Climate-Neutral Europe*; Buildings Performance Institute Europe: Brussels, Belgium, 2020.
 - [76] European Environment Agency. *Trends and Projections in Europe 2023*; Publications Office of the European Union: Luxembourg, Luxembourg, 2023. ISBN 978-92-9480-606-2.
 - [77] Observatorio Ciudad 3R. *Informe de evaluación sobre políticas públicas de rehabilitación residencial en España (2013-2017). Reflexiones sobre el desafío 2020 / 2030*; Rubio del Val, J., Ed.; Observatorio Ciudad 3R - ECODES - Ministerio para la Transición Ecológica: Zaragoza, España, 2020. ISBN 978-84-09-19847-4.
 - [78] European Environment Agency. *Greenhouse Gas Emissions from Energy Use in Buildings by Country*. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissionsfrom-energy/greenhouse-gas-emissions-from-energy> (consultado el 21 de noviembre de 2024).
 - [79] Gómez Gil, M. *Diagnóstico de la rehabilitación de viviendas en el medio rural en España*. En *RuralREGEN Estudio sobre el estado de la rehabilitación energética de viviendas en el ámbito rural en España: diagnóstico, barreras y soluciones*; ECODES - Fundación Ecología y Desarrollo: Madrid, España, 2022; pp. 95–102. ISBN 978-84-18321-64-1.
 - [80] Beltrán-Velamazán, C.; Gómez-Gil, M.; Monzón-Chavarrías, M.; Espinosa-Fernández, A.; LópezMesa, B. Measuring the Decarbonisation Progress of Buildings Based on European Open Big Data. En *CONNECT. International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies*, 15-17 May 2024, Riga, Latvia. ISBN 978-9934-37-065-6. <https://doi.org/10.7250/CONNECT.2024.015>.
 - [81] Beltrán Velamazán, C.; Monzón Chavarrías, M.; López Mesa, B. Review of the Current State of Development of the Progress Indicators in National Long-Term Renovation Strategies. En *Jornada de Jóvenes Investigadores del I3A*; Zaragoza, España, 21 de octubre de 2021. ISSN 2341-4790.
 - [82] Department for Energy and Sustainable Building Office for Sustainable Buildings Walloon Public Service. *Walloon Long-Term Building Renovation Strategy*; Wallonia service public: Wallonia, Belgium, 2021.
 - [83] López-Mesa, B.; Oregi, X., Eds. *Assessing Progress in Decarbonizing Spain's Building Stock*; Springer Nature Switzerland: Cham, Switzerland, 2024. ISBN 978-3-031-51829-4.
 - [84] Gómez-Gil, M.; Etxebarria-Mallea, M.; Arbulu, M.; Oregi, X.; Espinosa-Fernández, A.; Monzón-Chavarrías, M. Indicators and Data in Spain for an Overview of the General Characteristics of the National Building Stock. En *Assessing Progress in Decarbonizing Spain's Building Stock: Indicators and Data Availability*; López-Mesa, B., Oregi, X., Eds.; Springer Nature Switzerland: Cham, Switzerland, 2024; pp. 57–105. ISBN 978-3-031-51829-4.

- [85] Gómez-Gil, M.; Espinosa-Fernández, A.; López-Mesa, B.; Monzón-Chavarrias, M. Indicators and Data in Spain for an Overview of the Energy Characteristics of the National Building Stock. En *Assessing Progress in Decarbonizing Spain's Building Stock: Indicators and Data Availability*; López-Mesa, B., Oregi, X., Eds.; Springer Nature Switzerland: Cham, Switzerland, 2024; pp. 107–126. ISBN 978-3-031-51829-4.
- [86] Arbulu, M.; Gómez-Gil, M.; González-González, F.J.; Espinosa-Fernández, A. Indicators and Data in Spain for an Overview of Deep Renovation of Buildings. En *Assessing Progress in Decarbonizing Spain's Building Stock: Indicators and Data Availability*; López-Mesa, B., Oregi, X., Eds.; Springer Nature Switzerland: Cham, Switzerland, 2024; pp. 127–155. ISBN 978-3-031-51829-4.
- [87] Beltrán-Velamazán, C.; Arbulu, M.; Gómez-Gil, M.; Rueda-Esteban, M.; Espinosa-Fernández, A.; López-Mesa, B. Indicators and Data in Spain Regarding an Overview of Worst Performing Segments of the National Building Stock, Rented Properties and Energy Poverty. En *Assessing Progress in Decarbonizing Spain's Building Stock: Indicators and Data Availability*; López-Mesa, B., Oregi, X., Eds.; Springer Nature Switzerland: Cham, Switzerland, 2024; pp. 157–178. ISBN 978-3-031-51829-4.
- [88] Gómez-Gil, M.; Arbulu, M.; Rueda-Esteban, M.; Monzón-Chavarrias, M.; Beltrán-Velamazán, C.; González-González, F.J. Indicators and Data in Spain Regarding an Overview of the Capacities in the Construction, Energy Efficiency and Renewable Energy Sector. En *Assessing Progress in Decarbonizing Spain's Building Stock: Indicators and Data Availability*; López-Mesa, B., Oregi, X., Eds.; Springer Nature Switzerland: Cham, Switzerland, 2024; pp. 179–200. ISBN 978-3-031-51829-4.
- [89] Gómez-Gil, M.; Arbulu, M.; Oregi, X.; Monzón-Chavarrias, M.; Beltrán-Velamazán, C.; González-González, F.J. Indicators and Data in Spain for an Overview of Actual Energy Savings and Wider Benefits of Renovation of Buildings. En *Assessing Progress in Decarbonizing Spain's Building Stock: Indicators and Data Availability*; López-Mesa, B., Oregi, X., Eds.; Springer Nature Switzerland: Cham, Switzerland, 2024; pp. 201–243. ISBN 978-3-031-51829-4.
- [90] Gómez-Gil, M.; Etxebarria-Mallea, M.; Arbulu, M.; Grijalba-Aseguinolaza, O.; Espinosa-Fernández, A.; Monzón-Chavarrias, M. Indicators and Data in Spain Regarding Evidence-Based Estimate of Expected Energy Savings and of Reduction of Costs for Health Systems from Buildings Renovation. En *Assessing Progress in Decarbonizing Spain's Building Stock: Indicators and Data Availability*; López-Mesa, B., Oregi, X., Eds.; Springer Nature Switzerland: Cham, Switzerland, 2024; pp. 245–259. ISBN 978-3-031-51829-4.
- [91] Arbulu, M.; Gómez-Gil, M.; Rueda-Esteban, M.; Monzón-Chavarrias, M.; Espinosa-Fernández, A. Indicators and Data in Spain Regarding Policies and Measures for the Mobilization of Investments into the Renovation of Buildings. En *Assessing Progress in Decarbonizing Spain's Building Stock: Indicators and Data Availability*; López-Mesa, B., Oregi, X., Eds.; Springer Nature Switzerland: Cham, Switzerland, 2024; pp. 261–289. ISBN 978-3-031-51829-4.

-
- [92] Valinejadshoubi, M.; Moselhi, O.; Bagchi, A.; Salem, A. Development of an IoT and BIM-Based Automated Alert System for Thermal Comfort Monitoring in Buildings. *Sustain Cities Soc* **2021**, *66*, 102602, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102602>.
- [93] Sandaruwan, I.P.; Janardana, J.A.B.; Waidyasekara, A. Data Science Applications for Carbon Footprint Management in Buildings: A Systematic Literature Review. En *Proceedings of the 11th World Construction Symposium*; Sri Lanka, 2023; pp. 446–459.
- [94] Zhang, Z.; Chen, M.; Zhong, T.; Zhu, R.; Qian, Z.; Zhang, F.; Yang, Y.; Zhang, K.; Santi, P.; Wang, K.; et al. Carbon Mitigation Potential Afforded by Rooftop Photovoltaic in China. *Nat Commun* **2023**, *14*, 2347, doi:10.1038/s41467-023-38079-3.
- [95] Anand, A.; Deb, C. The Potential of Remote Sensing and GIS in Urban Building Energy Modelling. *Energy and Built Environment* **2023**, *5*, 957–969, <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2023.07.008>.
- [96] Gómez-Gil, M.; Sesana, M.M.; Salvalai, G.; Espinosa-Fernández, A.; López-Mesa, B. The Digital Building Logbook as a Gateway Linked to Existing National Data Sources: The Cases of Spain and Italy. *Journal of Building Engineering* **2023**, *63*, 105461, <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105461>.
- [97] Gevorgian, A.; Pezzutto, S.; Zambotti, S.; Croce, S.; Filippi Oberegger, U.; Lollini, R.; Kranzl, L.; Müller, A. *European Building Stock Analysis - A Country by Country Descriptive and Comparative Analysis of the Energy Performance of Buildings*; Eurac Research: Bolzano, Italia, 2022. ISBN 978-88- 98857-68-5.
- [98] Aboltins, R.; Jaunzems, D.; Pubule, J.; Blumberga, D. Are Hugs, Carrots and Sticks Essential for Energy Policy: A Study of Latvia's National Energy and Climate Plan. *Environmental and Climate Technologies* **2020**, *24*, 309–324, doi:10.2478/rtuect-2020-0075.
- [99] International Energy Agency. *Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency*. International Energy Agency: Paris, France, 2014. <https://doi.org/10.1787/9789264220720-en>.
- [100] Beltrán-Velamazán, C.; Monzón-Chavarrias, M.; López-Mesa, B. A New Approach for National-Scale Building Energy Models Based on Energy Performance Certificates in European Countries: The Case of Spain. *Heliyon* **2024**, *10*, e25473, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25473>
- [101] Gómez-Gil, M.; Espinosa-Fernández, A.; López-Mesa, B. A New Functionality for the Digital Building Logbook: Assessing the Progress of Decarbonisation of National Building Sectors. *Environ Impact Assess Rev* **2024**, *105*, 107393, <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107393>.
- [102] European Parliament; Council of the European Union. *Directive (EU) 2019/1024 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2019 on Open Data and the Re-Use of Public Sector Information (Recast)*; Official Journal of the European Union: Brussels, Belgium, 2019; pp. 56–83.
- [103] European Commission. *Commission Staff Working Document Impact Assessment Report Accompanying the Document Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the*

- Council Laying down Measures for a High Level of Public Sector Interoperability across the Union (Interoperable Europe Act)*; EUR-Lex, 2022.
- [104] European Commission - Directorate-General for Communications Networks Content and Technology. *A European Strategy for Data*. Disponible en: <https://digitalstrategy.ec.europa.eu/en/policies/strategy-data> (consultado el 21 de noviembre de 2024).
- [105] European Commission Joint Research Centre T1 Unit. *Enabling Access to European Geospatial Data for the Green Deal*. Disponible en: <https://inspiregeoportal.ec.europa.eu/srv/spa/catalog.search#/home> (consultado el 21 de noviembre de 2024).
- [106] Cetl, V.; Šamanović, S.; Bjelotomić Oršulić, O.; Lisec, A. Building a Cadastral Map of Europe through the INSPIRE and Other Related Initiatives. *Land (Basel)* **2023**, *12*, doi:10.3390/land12071462.
- [107] European Commission. *INSPIRE Knowledge Base - Maintenance and Implementation*. Disponible en: https://knowledge-base.inspire.ec.europa.eu/overview/maintenance-andimplementation_en?prefLang=fr (consultado el 25 de septiembre de 2024).
- [108] European Commission. *Commission Regulation (EU) No 1089/2010 of 23 November 2010 Implementing Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council as Regards Interoperability of Spatial Data Sets and Services*; Official Journal of the European Union: Brussels, Belgium, 2010; pp. 11–102.
- [109] INSPIRE Maintenance and Implementation. *GitHub - INSPIRE Maintenance and Implementation*. Disponible en: <https://github.com/INSPIRE-MIF> (consultado el 20 de septiembre de 2024).
- [110] Dirección General del Catastro. *Conjunto de datos INSPIRE de la Dirección General del Catastro*; Dirección General del Catastro: Madrid, España, 2016.
- [111] Organismo Autónomo Centro Nacional de Información Geográfica. *Centro de Descargas*. Disponible en: <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp> (consultado el 21 de noviembre de 2024).
- [112] Ministerio de la Presidencia. *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*; Boletín Oficial del Estado: Madrid, España, 2013; pp. 27548–27562.
- [113] Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática. *Real Decreto 390/2021, de 1 de junio, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios*; Boletín Oficial del Estado: Madrid, España, 2021; pp. 67351–67373.
- [114] Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática. *Real Decreto 450/2022, de 14 de junio, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo*; Boletín Oficial del Estado: Madrid, España, 2022; pp. 81973–81989.

-
- [115] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico; Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. *Condiciones técnicas de los procedimientos para la evaluación de la eficiencia energética*; Madrid, España, 2020.
 - [116] Asociación Española de Normalización. *UNE-EN ISO 52000-1 Energy Performance of Buildings - Overarching EPB Assessment - Part 1: General Framework and Procedures*, 2019. ISO 52000-1:2017; Asociación Española de Normalización, España, 2019.
 - [117] Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja; Asociación de Investigación y Cooperación Industrial de Andalucía. *Calificación de la eficiencia energética de los edificios*; Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico: Madrid, España, 2015.
 - [118] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. *Procedimientos para la certificación de edificios*. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/energia/eficiencia/certificacionenergetica/documentos-reconocidos/procedimientos-certificacion-proyecto-terminados.html> (consultado el 21 de noviembre de 2024).
 - [119] Jefatura del Estado. *Ley 8/2013, de 26 de junio, de rehabilitación, regeneración y renovación urbanas*; Boletín Oficial del Estado: Madrid, España, 2013; pp. 47964–48023.
 - [120] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico; Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. *Informe de evaluación energética del edificio en formato electrónico (XML)*; Madrid, España, 2020.
 - [121] Pasichnyi, O.; Wallin, J.; Levihn, F.; Shahrokni, H.; Kordas, O. Energy Performance Certificates — New Opportunities for Data-Enabled Urban Energy Policy Instruments? *Energy Policy* **2019**, *127*, 486–499, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.11.051>.
 - [122] Dall'O', G.; Sarto, L.; Sanna, N.; Tonetti, V.; Ventura, M. On the Use of an Energy Certification Database to Create Indicators for Energy Planning Purposes: Application in Northern Italy. *Energy Policy* **2015**, *85*, 207–217, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.06.015>.
 - [123] Camboni, R.; Corsini, A.; Miniaci, R.; Valbonesi, P. Mapping Fuel Poverty Risk at the Municipal Level. A Small-Scale Analysis of Italian Energy Performance Certificate, Census and Survey Data. *Energy Policy* **2021**, *155*, 112324, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112324>.
 - [124] Heidenthaler, D.; Leeb, M.; Reindl, P.; Kranzl, L.; Bednar, T.; Molting, M. Building Stock Characteristics of Residential Buildings in Salzburg, Austria Based on a Structured Analysis of Energy Performance Certificates. *Energy Build* **2022**, *273*, 112401, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112401>.
 - [125] Drousta, K.G.; Kontoyiannidis, S.; Dascalaki, E.G.; Balaras, C.A. Mapping the Energy Performance of Hellenic Residential Buildings from EPC (Energy Performance Certificate) Data. *Energy* **2016**, *98*, 284–295, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.137>.
 - [126] Jonkutė, G.; Norvaišienė, R.; Banionis, K.; Monstvilas, E.; Bliūdžius, R. Analysis of Carbon Dioxide Emissions in Residential Buildings through Energy Performance Certification in Lithuania. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy* **2021**, *16*, 198–215, doi:10.1080/15567249.2020.1773581.

- [127] Pagliaro, F.; Hugony, F.; Zanghirella, F.; Basili, R.; Misceo, M.; Colasuonno, L.; Del Fatto, V. Assessing Building Energy Performance and Energy Policy Impact through the Combined Analysis of EPC Data – The Italian Case Study of SIAPE. *Energy Policy* **2021**, *159*, 112609, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112609>.
- [128] Dirección General del Catastro. *Resolución de 23 de marzo de 2011, de la Dirección General del Catastro, por la que se aprueban los criterios de acceso, formatos de entrega y condiciones de la licencia-tipo para el acceso al servicio de descarga masiva de datos y cartografía, a través de la Sede Electrónica del Catastro*; Dirección General del Catastro: Madrid, España, 2011.
- [129] Dirección General del Catastro. *Guía de servicios de la Sede Electrónica del Catastro. Parte I: Servicios a ciudadanos, empresas y profesionales. Versión 1.11*; Dirección General del Catastro: Madrid, España, 2024.
- [130] Dirección General del Catastro. *Preguntas frecuentes acerca del formato CAT Versión 1.0*. Disponible en: https://www.catastro.hacienda.gob.es/documentos/preguntas_frecuentes_formato_CAT.pdf (consultado el 28 de octubre de 2024).
- [131] Ministerio de Hacienda y Función Pública. *Fichero informático de remisión de catastro a Comunidades Autónomas (bienes inmuebles urbanos, rústicos y de características especiales)*; Ministerio de Hacienda y Función Pública: Madrid, España, 2023.
- [132] Dirección General del Catastro. *Licencia de descarga de productos catastrales*. Disponible en: <https://www.catastro.hacienda.gob.es/pdf/ovc/licdescargaES.pdf> (consultado el 28 de octubre de 2024).
- [133] Instituto Nacional de Estadística. *El Instituto Nacional de Estadística*. Disponible en: <https://www.ine.es/dyngs/INE/es/index.htm?cid=498> (consultado el 28 de octubre de 2024).
- [134] Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana. *Observatorio de la Vulnerabilidad Urbana*. Disponible en: <https://www.mivau.gob.es/urbanismo-y-suelo/urbanismo/observatorio-de-la-vulnerabilidadurbana> (consultado el 28 de octubre de 2024).
- [135] Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana. *¿Qué es el Atlas de la Edificación Residencial en España 2001-2011?*. Disponible en: <https://atlasedificacion.mitma.es/#c=home> (consultado el 28 de octubre de 2024).
- [136] Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana. *¿Qué es el Atlas de la Vulnerabilidad Urbana en España?*. Disponible en: <https://atlasvulnerabilidadurbana.mitma.es/#c=article&page=P004> (consultado el 28 de octubre de 2024).
- [137] Instituto Vasco de Estadística. *Sección censal*. Disponible en: https://www.eustat.eus/documentos/elem_3830/definicion.html (consultado el 28 de octubre de 2024).
- [138] Instituto Nacional de Estadística. *Cartografía digitalizada de secciones censales*. Disponible en: https://www.ine.es/ss/Satellite?L=es_ES&c=Page&cid=1259952026632&p=1259952026632&pagename=ProductosYServicios%2FPYSLayout (consultado el 28 de octubre de 2024).

-
- [139] Ministerio de Fomento; Instituto Juan de Herrera. *Análisis de las características de la edificación residencial en España en 2011*; Ministerio de Fomento: Madrid, España, 2014.
- [140] Ministerio de Vivienda. *Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación*; Boletín Oficial del Estado: Madrid, España, 2006; pp. 11816–11831.
- [141] Presidencia del Gobierno. *Real Decreto 2429/1979, de 6 de julio, por el que se aprueba la Norma Básica de Edificación NBE-CT-79, sobre condiciones térmicas en los edificios*; Boletín Oficial del Estado: Madrid, España, 1979; pp. 24524–24550.
- [142] National Geographic Society. *GIS (Geographic Information System)*. Disponible en: <https://education.nationalgeographic.org/resource/geographic-information-system-gis/> (consultado el 21 de noviembre de 2024).
- [143] Pandas development team. *GitHub - Pandas-Dev/Pandas*. Disponible en: <https://github.com/pandas-dev/pandas> (consultado el 21 de noviembre de 2024).
- [144] McKinney, W. Data Structures for Statistical Computing in Python. En *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*; van der Walt, S., Millman, J., Eds.; 2010; pp. 56–61.
- [145] Ali, U.; Shamsi, M.H.; Alshehri, F.; Mangina, E.; O'Donnell, J. Comparative Analysis of Machine Learning Algorithms for Building Archetypes Development in Urban Energy Modeling. En *Proceedings of the Building Performance Analysis Conference and SimBuild*; ASHRAE/IBPSA-USA, September 26 2018; Vol. 8, pp. 60–67.
- [146] Ali, U.; Bano, S.; Shamsi, M.H.; Sood, D.; Hoare, C.; Zuo, W.; Hewitt, N.; O'Donnell, J. Urban Building Energy Performance Prediction and Retrofit Analysis Using Data-Driven Machine Learning Approach. *Energy Build* **2024**, *303*, 113768, doi:10.1016/j.ENBUILD.2023.113768.
- [147] Li, X.; Yao, R. Modelling Heating and Cooling Energy Demand for Building Stock Using a Hybrid Approach. *Energy Build* **2021**, *235*, 110740, doi:10.1016/j.enbuild.2021.110740.
- [148] Garbasevski, O.M.; Estevam Schmiedt, J.; Verma, T.; Lefter, I.; Korthals Altes, W.K.; Droin, A.; Schiricke, B.; Wurm, M. Spatial Factors Influencing Building Age Prediction and Implications for Urban Residential Energy Modelling. *Comput Environ Urban Syst* **2021**, *88*, 101637, doi:10.1016/J.COMPENVURBSYS.2021.101637.
- [149] Buckley, N.; Mills, G.; Reinhart, C.; Berzolla, Z.M. Using Urban Building Energy Modelling (UBEM) to Support the New European Union's Green Deal: Case Study of Dublin Ireland. *Energy Build* **2021**, *247*, 111115, doi:10.1016/J.ENBUILD.2021.111115.
- [150] García-Pérez, S.; Sierra-Pérez, J.; Boschmonart-Rives, J. Environmental Assessment at the Urban Level Combining LCA-GIS Methodologies: A Case Study of Energy Retrofits in the Barcelona Metropolitan Area. *Build Environ* **2018**, *134*, 191–204, doi:10.1016/J.BUILDENV.2018.01.041.
- [151] Ang, Y.Q.; Berzolla, Z.M.; Reinhart, C.F. From Concept to Application: A Review of Use Cases in Urban Building Energy Modeling. *Appl Energy* **2020**, *279*, 115738, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115738>.

- [152] Groppi, D.; de Santoli, L.; Cumo, F.; Astiaso Garcia, D. A GIS-Based Model to Assess Buildings Energy Consumption and Usable Solar Energy Potential in Urban Areas. *Sustain Cities Soc* **2018**, *40*, 546–558, doi:10.1016/J.SCS.2018.05.005.
- [153] Johari, F.; Peronato, G.; Sadeghian, P.; Zhao, X.; Widén, J. Urban Building Energy Modeling: State of the Art and Future Prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2020**, *128*, 109902, doi:10.1016/j.rser.2020.109902.
- [154] Kavgic, M.; Mavrogianni, A.; Mumovic, D.; Summerfield, A.; Stevanovic, Z.; Djurovic-Petrovic, M. A Review of Bottom-up Building Stock Models for Energy Consumption in the Residential Sector. *Build Environ* **2010**, *45*, 1683–1697, doi:10.1016/j.buildenv.2010.01.021.
- [155] Li, Y.; Liu, C. Estimating Solar Energy Potentials on Pitched Roofs. *Energy Build* **2017**, *139*, 101–107, doi:10.1016/j.enbuild.2016.12.070.
- [156] Li, Z.; Lin, B.; Zheng, S.; Liu, Y.; Wang, Z.; Dai, J. A Review of Operational Energy Consumption Calculation Method for Urban Buildings. *Build Simul* **2020**, *13*, 739–751, doi:10.1007/s12273-020-0619-0.
- [157] Ali, U.; Shamsi, M.H.; Hoare, C.; Mangina, E.; O'Donnell, J. Review of Urban Building Energy Modeling (UBEM) Approaches, Methods and Tools Using Qualitative and Quantitative Analysis. *Energy Build* **2021**, *246*, 111073, doi:10.1016/j.enbuild.2021.111073.
- [158] Heidenthaler, D.; Deng, Y.; Leeb, M.; Grobbauer, M.; Kranzl, L.; Seiwald, L.; Mascherbauer, P.; Reindl, P.; Bednar, T. Automated Energy Performance Certificate Based Urban Building Energy Modelling Approach for Predicting Heat Load Profiles of Districts. *Energy* **2023**, *278*, 128024, doi:10.1016/j.energy.2023.128024.
- [159] Apostolopoulou, A.; Boyd, D.; Carlos, C.; Cavazzi, S.; Wilson, R.; Jimenez-Bescos, C. Optimization of Computational Time for Urban Building Energy Modelling, through Generalizing the Building Footprint. A Case Study in London, UK. En *Proceedings of the 31st GISRUK Conference 2023*; Glasgow, United Kingdom, April 19 2023.
- [160] Deurinck, M.; Saelens, D.; Roels, S. Predicting Energy Savings at District Level: Representative vs. Individual Dwelling Approach. En *Proceedings of the 10th Nordic Symposium on Building Physics*; 2014.
- [161] Oraipoulos, A.; Howard, B. On the Accuracy of Urban Building Energy Modelling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2022**, *158*, 111976, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111976>.
- [162] Beltrán-Velamazán, C.; Monzón-Chavarrias, M.; López-Mesa, B. Predicting Energy and Emissions in Residential Building Stocks: National UBEM with Energy Performance Certificates and Artificial Intelligence. *Applied Sciences* **2025**, *15*, 514. <https://doi.org/10.3390/app15020514>.
- [163] García-López, J.; Sendra, J.J.; Domínguez-Amarillo, S. Validating ‘GIS-UBEM’—A Residential Open Data-Driven Urban Building Energy Model. *Sustainability* **2024**, *16*, 2599. <https://doi.org/10.3390/su1606259>

-
- [164] Heidenthaler, D.; Deng, Y.; Leeb, M.; Grobbauer, M.; Kranzl, L.; Seiwald, L.; Mascherbauer, P.; Reindl, P.; Bednar, T. Automated Energy Performance Certificate Based Urban Building Energy Modelling Approach for Predicting Heat Load Profiles of Districts. *Energy* **2023**, *278*, 128024, doi:10.1016/J.ENERGY.2023.128024.
 - [165] Blázquez, T.; Suárez, R.; Ferrari, S.; Sendra, J.J. Addressing the Potential for Improvement of Urban Building Stock: A Protocol Applied to a Mediterranean Spanish Case. *Sustain Cities Soc* **2021**, *71*, 102967, doi:10.1016/J.SCS.2021.102967.
 - [166] Sokol, J.; Cerezo Davila, C.; Reinhart, C.F. Validation of a Bayesian-Based Method for Defining Residential Archetypes in Urban Building Energy Models. *Energy Build* **2017**, *134*, 11–24, doi:10.1016/J.ENBUILD.2016.10.050.
 - [167] Eggimann, S.; Vulic, N.; Rüdisüli, M.; Mutschler, R.; Orehounig, K.; Sulzer, M. Spatiotemporal Upscaling Errors of Building Stock Clustering for Energy Demand Simulation. *Energy Build* **2022**, *258*, 111844, doi:10.1016/J.ENBUILD.2022.111844.
 - [168] De Jaeger, I.; Reynders, G.; Callebaut, C.; Saelens, D. A Building Clustering Approach for Urban Energy Simulations. *Energy Build* **2020**, *208*, 109671, doi:10.1016/J.ENBUILD.2019.109671.
 - [169] Martín-Consuegra, F.; de Frutos, F.; Oteiza, I.; Agustín, H.A. Use of Cadastral Data to Assess Urban Scale Building Energy Loss. Application to a Deprived Quarter in Madrid. *Energy Build* **2018**, *171*, 50–63, doi:10.1016/J.ENBUILD.2018.04.007.
 - [170] Aguacil, S.; Lufkin, S.; Rey, E.; Cuchi, A. Application of the Cost-Optimal Methodology to Urban Renewal Projects at the Territorial Scale Based on Statistical Data — A Case Study in Spain. *Energy Build* **2017**, *144*, 42–60, doi:10.1016/J.ENBUILD.2017.03.047.
 - [171] Fabbri, K.; Zuppiroli, M.; Ambrogio, K. Heritage Buildings and Energy Performance: Mapping with GIS Tools. *Energy Build* **2012**, *48*, 137–145, doi:10.1016/J.ENBUILD.2012.01.018.
 - [172] van Eck, N.J.; Waltman, L. Software Survey: VOSviewer, a Computer Program for Bibliometric Mapping. *Scientometrics* **2010**, *84*, 523–538, doi:10.1007/s11192-009-0146-3.
 - [173] Beltrán-Velamazán, C.; Monzón-Chavarrías, M.; López-Mesa, B. *GitHub - NBEM: Code to Generate National-Scale Building Energy Models Based on Energy Performance Certificates*. Disponible en: <https://github.com/CarlosBeltranVelamazan/NBEM> (consultado el 24 de octubre de 2024).
 - [174] Yan, X.; Liu, S.; Liu, W.; Dai, Q. An Improved Coverage-Oriented Retrieval Algorithm for LargeArea Remote Sensing Data. *Int J Digit Earth* **2022**, *15*, 606–625, doi:10.1080/17538947.2022.2030816.
 - [175] Instituto Nacional de Estadística. *España en cifras 2019*; Instituto Nacional de Estadística: Madrid, España, 2019.
 - [176] Instituto Nacional de Estadística. *Cifras de Población (CP) a 1 de julio de 2022 y Estadística de Migraciones (EM)*; Instituto Nacional de Estadística: Madrid, España, 2022.
 - [177] Beltrán-Velamazán, C.; Gómez-Gil, M.; Monzón-Chavarrías, M.; Espinosa-Fernández, A.; LópezMesa, B. Harnessing Open European Data for a Data-Driven Approach to

- Enhancing Decarbonization Measurement in the Built Environment. *Environmental and Climate Technologies* **2024**, 28, 776–793, <https://doi.org/10.2478/rtuect-2024-0060>.
- [178] Dirección General del Catastro. *Conjunto de datos INSPIRE de la Dirección General del Catastro*; Dirección General del Catastro: Madrid, España, 2016.
- [179] Organismo Autónomo Centro Nacional de Información Geográfica. *Centro de descargas*. Disponible en: <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp> (consultado el 21 de noviembre de 2024).
- [180] Ministerio De Vivienda y Agenda Urbana. *Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Ahorro de Energía*; Ministerio De Vivienda y Agenda Urbana: Madrid, España, 2019.
- [181] Instituto Nacional de Estadística. *Cifras oficiales de población en los municipios españoles*. Disponible en: <https://www.ine.es/dynt3/inebase/es/index.htm?padre=525> (consultado el 21 de noviembre de 2024).
- [182] Consejería de Industria Energía y Minas de la Junta de Andalucía. *Registro de Certificados Energéticos de Andalucía*. Disponible en: <https://www.juntadeandalucia.es/datosabiertos/portal/dataset/registro-de-certificados-energeticos-de-andalucia> (consultado el 9 de octubre de 2024).
- [183] Dirección General de Energía y Minas del Gobierno de Aragón. *Registro de certificación de eficiencia energética de edificios de Aragón*. Disponible en: <https://opendata.aragon.es/datos/catalogo/dataset/registro-de-certificacion-de-eficiencia-energetica-de-edificios-de-aragon> (consultado el 9 de octubre de 2024).
- [184] Dirección General de Energía Minería y Reactivación de la Consejería de Industria Empleo y Promoción Económica del Principado de Asturias. *Certificados de Eficiencia Energética de edificios y viviendas*. Disponible en: <https://datos.gob.es/es/catalogo/a03002951-eficiencia-energetica-edif-viv> (consultado el 9 de octubre de 2024).
- [185] Direcció General d'Energia i Canvi Climàtic. *Certificats Eficiència Energètica Edificis Illes Balears*. Disponible en: <https://catalegdades.caib.cat/Energia/Certificats-Eficiencia-Energica-Edificis-Illes-B/bhvx-p8vz> (consultado el 9 de octubre de 2024).
- [186] Departamento de Desarrollo Económico Sostenibilidad y Medio Ambiente del Gobierno Vasco. *Registro de Certificados de Eficiencia Energética de Euskadi*. Disponible en: <https://opendata.euskadi.eus/catalogo/-/registro-de-certificados-de-eficiencia-energetica-de-euskadi/> (consultado el 9 de octubre de 2024).
- [187] Consejería de Transición Ecológica Lucha contra el Cambio Climático y Planificación Territorial del Gobierno de Canarias. *Certificados de Eficiencia Energética de edificios*. Disponible en: <https://datos.canarias.es/catalogos/general/dataset/certificados-de-eficiencia-energetica-de-edificios> (consultado el 9 de octubre de 2024).
- [188] Consejería de Industria Empleo Innovación y Comercio del Gobierno de Cantabria. *Registro de Certificaciones de Eficiencia Energética*. Disponible en: https://dgicc.cantabria.es/detalle/-/journal_content/56_INSTANCE_DETALLE/16626/2199441 (accessed on 9 October 2024).

-
- [189] Junta de Castilla y León. *Certificados de Eficiencia Energética inscritos en el Registro de Certificados de Eficiencia Energética de Castilla León*. Disponible en: <https://datos.gob.es/es/catalogo/a07002862-certificados-de-eficiencia-energetica> (consultado el 9 de octubre de 2024).
- [190] Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha. *Registro Autonómico de Certificados de Eficiencia Energética de Edificios de Castilla-La Mancha*. Disponible en: <https://datosabiertos.castillalamancha.es/dataset/registro-auton%C3%B3mico-de-certificados-de-eficiencia-energ%C3%A9tica-de-edificios-de-castilla-la> (consultado el 9 de octubre de 2024).
- [191] Generalitat de Catalunya. Departament d'Acció Climàtica Alimentació i Agenda Rural. *Certificats d'eficiència Energètica d'edificis*. Disponible en: <https://analisi.transparenciacatalunya.cat/Energia/Certificats-d-efici-ncia-energ-tica-d-edificis/j6ii-t3w2> (consultado el 9 de octubre de 2024).
- [192] IVACE Energía. Registro de Certificación Energética de Edificios. Disponible en: <https://gceedadadesobertes.aven.es/dadesobertes/> (consultado el 9 de octubre de 2024).
- [193] Junta de Extremadura. Relación de Certificados de Eficiencia Energética Registrados En La Junta de Extremadura. Disponible en: <https://datos.gob.es/es/catalogo/a11002926-registro-de-certificados-de-eficiencia-energetica> (consultado el 9 de octubre de 2024).
- [194] Xunta de Galicia. Registro de Certificados de Eficiencia Energética de Edificios de Galicia. Disponible en: <https://datos.gob.es/es/catalogo/a12002994-registro-de-certificados-de-eficiencia-energetica-de-edificios-de-galicia> (consultado el 9 de octubre de 2024).
- [195] Consejería de Sostenibilidad y Transición Ecológica de La Rioja. *Certificados Energéticos de Edificios*. Disponible en: <https://web.larioja.org/dato-abierto/datoabierto?n=opd-882> (consultado el 9 de octubre de 2024).
- [196] Consejería de Medio Ambiente Agricultura e Interior de la Comunidad de Madrid. *Registro de Certificados de Eficiencia Energética de Edificios*. Disponible en: https://datos.comunidad.madrid/dataset/registro_certificados_eficiencia_energetica (consultado el 9 de octubre de 2024).
- [197] Comunidad Foral de Navarra. *Certificaciones Energéticas*. Disponible en: <https://datos.gob.es/es/catalogo/a15002917-certificaciones-energeticas> (consultado el 9 de octubre de 2024).
- [198] Ministerio de Hacienda y Función Pública. *Fichero informático de remisión del Padrón Catastral (bienes inmuebles urbanos, rústicos y de características especiales)*; Ministerio de Hacienda y Función Pública: Madrid, España, 2023.
- [199] Zhou, Q. *Digital Elevation Model and Digital Surface Model*. En *The International Encyclopedia of Geography*; 2017; pp. 1–17. ISBN 9780470659632.
- [200] Federal Office of Topography. *Landscape Models*. Disponible en: <https://www.swisstopo.admin.ch/en/landscape-models> (consultado el 12 de noviembre de 2024).

- [201] Ministerio de la Presidencia. *Real Decreto 1071/2007, de 27 de julio, por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España*; Boletín Oficial del Estado: Madrid, España, 2007; pp. 35986– 35989.
- [202] Beltran-Velamazan, C.; Monzón-Chavarriás, M.; López-Mesa, B. Clasificación y caracterización del parque habitacional en zonas rurales. En *RuralREGEN Estudio sobre el estado de la rehabilitación energética de viviendas en el ámbito rural en España: diagnóstico, barreras y soluciones*; ECODES - Fundación Ecología y Desarrollo: Madrid, España, 2022; pp. 17–38. ISBN 978-84-18321-64-1.
- [203] González Fernández, I.; Pérez Moreno, L.C. Análisis de necesidades domésticas en zonas rurales. En *RuralREGEN Estudio sobre el estado de la rehabilitación energética de viviendas en el ámbito rural en España: diagnóstico, barreras y soluciones*; ECODES - Fundación Ecología y Desarrollo: Madrid, España, 2022; pp. 39–78. ISBN 978-84-18321-64-1.
- [204] Monzón Chavarriás, M.; López Mesa, B. Potencial de ahorro energético y de emisiones contaminantes con la rehabilitación de la vivienda rural, y costes asociados. In *RuralREGEN Estudio sobre el estado de la rehabilitación energética de viviendas en el ámbito rural en España: diagnóstico, barreras y soluciones*; ECODES - Fundación Ecología y Desarrollo: Madrid, España, 2022; pp. 87– 91. ISBN 978-84-18321-64-1.
- [205] Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana. *Atlas de la Vulnerabilidad Urbana*. Disponible en: <https://atlasvulnerabilidadurbana.mitma.es/#c=home> (consultado el 26 de noviembre de 2024).
- [206] Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana. *Atlas de la Edificación Residencial en España*. Disponible en: <https://atlasedificacion.mitma.es/#c=home> (consultado el 26 de noviembre de 2024).
- [207] Amazon Web Services. *¿Qué es Extracción, Transformación y Carga (ETL)?*. Disponible en: <https://aws.amazon.com/what-is/etl/> (consultado el 26 de noviembre de 2024).
- [208] Microsoft. *Conceptos básicos sobre bases de datos*. Disponible en: <https://support.microsoft.com/es-es/topic/conceptos-b%C3%A1sicos-sobre-bases-de-datos-a849ac16-07c7-4a31-9948-3c8c94a7c204> (consultado el 26 de noviembre de 2024).
- [209] Terés-Zubiaga, J.; González-Pino, I.; Álvarez-González, I.; Campos-Celador, Á. Multidimensional Procedure for Mapping and Monitoring Urban Energy Vulnerability at Regional Level Using Public Data: Proposal and Implementation into a Case Study in Spain. *Sustain Cities Soc* **2023**, *89*, 104301, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104301>.
- [210] Iribar, E.; Sellens, I.; Angulo, L.; Hidalgo, J.M.; Sala, J.M. Nonconformities, Deviation and Improvements in the Quality Control of Energy Performance Certificates in the Basque Country. *Sustain Cities Soc* **2021**, *75*, 103286, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103286>.
- [211] Dirección General del Catastro. *Servicios web libres de la Sede Electrónica Del Catastro. Versión 2.4*; Dirección General del Catastro: Madrid, España, 2024.
- [212] Ministerio de Fomento. *Documento descriptivo climas de referencia*; Ministerio de Fomento: Madrid, España, 2017.

-
- [213] Ministerio de la Presidencia. *Real Decreto 1545/2007, de 23 de noviembre, por el que se regula el Sistema Cartográfico Nacional*; Boletín Oficial del Estado: Madrid, España, 2007.
- [214] Dirección General del Catastro. *Estadísticas catastrales*. Disponible en: <https://www.catastro.hacienda.gob.es/esp/estadisticas.asp> (consultado el 26 de enero de 2024).
- [215] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico; Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía; Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible; Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana. *Estado de la Certificación Energética de los edificios (11º Informe)*; Madrid, España, 2022.
- [216] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. *“Segmentación del parque residencial de viviendas en España en clústeres tipológicos”*. Estudio (01) para la ERESEE 2020; Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana: Madrid, España, 2020.
- [217] Eggimann, S.; Wagner, M.; Ho, Y.N.; Züger, M.; Schneider, U.; Orehounig, K. Geospatial Simulation of Urban Neighbourhood Densification Potentials. *Sustain Cities Soc* **2021**, *72*, 103068, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103068>.
- [218] Bellart, C.; Bosch, J. *El parque público y protegido de viviendas en España: un análisis desde el contexto europeo*; Torres Pascual, S., Ed.; Fundación Alternativas, 2018. ISBN 978-84-15860-87-7.
- [219] Huedo, P.; López-Mesa, B.; Mulet, E. Analysis of the Influence of Different Variables on the Impacts Related with the Envelope of Buildings for Residential Use, with Estimation of the Interaction of the User. *Advances in Building Energy Research* **2018**, *12*, 289–313, doi:10.1080/17512549.2017.1325400.
- [220] Jiménez Solana, M.Á. Clasificación Energética, ¿nueva Característica Catastral?. *CT Catastro* **2020**, *98*, 49–58. ISSN 1138-3488.
- [221] European Commission. *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European and Social Committee and the Committee of the Regions. A Renovation Wave for Europe— Greening Our Buildings, Creating Jobs, Improving Lives*; European Commission: Brussels, Belgium, 2020.
- [222] Xie, X.; Liu, Y.; Xu, Y.; He, Z.; Chen, X.; Zheng, X.; Xie, Z. Building Function Recognition Using the Semi-Supervised Classification. *Applied Sciences* **2022**, *12*, 9900, doi:10.3390/app12199900.
- [223] Beltran-Velamazan, C.; Monzón-Chavarrías, M.; López-Mesa, B. A Method for the Automated Construction of 3d Models of Cities and Neighborhoods from Official Cadaster Data for Solar Analysis. *Sustainability (Switzerland)* **2021**, *13*, <https://doi.org/10.3390/su13116028>.
- [224] Chen, T.; Guestrin, C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. En *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*; Association for Computing Machinery: New York, NY, USA, 2016; pp. 785–794.
- [225] Ruiz, G.R.; Bandera, C.F. Validation of Calibrated Energy Models: Common Errors. *Energies (Basel)* **2017**, *10*, doi:10.3390/en10101587.

- [226] ASHRAE, A.G. *Guideline 14-2014: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings*. American society of heating, refrigerating, and air conditioning engineers: Atlanta, Georgia, 2014.
- [227] Kavlakoglu, E.; Russi, E. *¿Qué es XGBoost?*. Disponible en: <https://www.ibm.com/es-es/topics/xgboost> (consultado el 25 de noviembre de 2024).
- [228] Filogamo, L.; Peri, G.; Rizzo, G.; Giaccone, A. On the Classification of Large Residential Buildings Stocks by Sample Typologies for Energy Planning Purposes. *Appl Energy* **2014**, *135*, 825–835, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.002>.
- [229] Olivo, Y.; Hamidi, A.; Ramamurthy, P. Spatiotemporal Variability in Building Energy Use in New York City. *Energy* **2017**, *141*, 1393–1401, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.066>.
- [230] Ahmed Gassar, A.A.; Yun, G.Y.; Kim, S. Data-Driven Approach to Prediction of Residential Energy Consumption at Urban Scales in London. *Energy* **2019**, *187*, 115973, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115973>.
- [231] Wang, D.; Landolt, J.; Mavromatidis, G.; Orehounig, K.; Carmeliet, J. CESAR: A Bottom-up Building Stock Modelling Tool for Switzerland to Address Sustainable Energy Transformation Strategies. *Energy Build* **2018**, *169*, 9–26, doi:10.1016/J.ENBUILD
- [232] Johari, F.; Shadram, F.; Widén, J. Urban Building Energy Modeling from Geo-Referenced Energy Performance Certificate Data: Development, Calibration, and Validation. *Sustain Cities Soc* **2023**, *96*, 104664, doi:10.1016/J.SCS.2023.104664.
- [233] Johari, F.; Lindberg, O.; Ramadhani, U.H.; Shadram, F.; Munkhammar, J.; Widén, J. Analysis of Large-Scale Energy Retrofit of Residential Buildings and Their Impact on the Electricity Grid Using a Validated UBEM. *Appl Energy* **2024**, *361*, 122937, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122937>.
- [234] Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana. *Actualización 2020 de la estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España*; Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana: Madrid, España, 2020.
- [235] Beltrán Velamazán, C.; Monzón Chavarrías, M.; López Mesa, B. Caracterización energética del parque edificado español a escala nacional a partir de datos en abierto: el caso de Zaragoza. En *Jornada de Jóvenes Investigadores del I3A*; Zaragoza, España, 26 de junio de 2024. <https://doi.org/10.26754/jjii3a.202410593>.
- [236] López-Ochoa, L.M.; Las-Heras-Casas, J.; Olasolo-Alonso, P.; López-González, L.M. Towards Nearly Zero-Energy Buildings in Mediterranean Countries: Fifteen Years of Implementing the Energy Performance of Buildings Directive in Spain (2006–2020). *Journal of Building Engineering* **2021**, *44*, 102962, doi:10.1016/J.JOBE.2021.102962.
- [237] Jareño Escudero, C.I.; Navarro Escudero, M.; Mifsut García, C.D.; Flores Fillol, M.; Salmerón Lissen, J.M. Potential of Energy Savings in the Public Housing Stock of Comunitat Valenciana Region by Applying the MedZEB Cost-Optimal Methodology. *Applied Sciences* **2021**, *12*, 138, doi:10.3390/app12010138.

-
- [238] Civiero, P.; Pascual, J.; Arcas Abella, J.; Salom, J. Innovative PEDRERA Model Tool Boosting Sustainable and Feasible Renovation Programs at District Scale in Spain. *Sustainability (Switzerland)* **2022**, *14*, doi:10.3390/su14159672.
- [239] Arcas Abella, J.; Pagès Ramon, A.; Bilbao, A. Herramienta UrbanZEB. Hacia El Desarrollo de Estrategias Urbanas de Transición Energética de Edificios. *ACE: Architecture, City and Environment* **2021**, *16*, doi:10.5821/ace.16.46.9888.
- [240] Ministerio de Fomento. Orden FOM/588/2017, de 15 de junio, por la que se modifican el Documento Básico DB-HE "Ahorro de energía" y el Documento Básico DB-HS "Salubridad", del Código Técnico de la Edificación, aprobado por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo; Boletín Oficial del Estado: Madrid, España, 2017; pp. 51621–51626.
- [241] Beltrán-Velamazán, C.; Monzón-Chavarrías, M.; López-Mesa, B. Estimación del potencial solar de las cubiertas y fachadas de ciudades desde modelos 3D y desde modelos GIS bidimensionales en España [Estimation of the Solar Potential of Roofs and Facades in Cities Using 3D Models and Two-Dimensional GIS Models in Spain]. En *International Conference on Energy Efficiency and Sustainability in Architecture and Urbanism (EESAP13)*; San Sebastián, España, 5 de octubre de 2022; pp. 112–125. ISBN 978-84-1319-499-8.
- [242] Ministerio de Hacienda y Administraciones Públicas. Documento 1. Memoria, criterios de valoración y listados de polígonos y zonas de valor. Ministerio de Hacienda y Administraciones Públicas: Madrid, España, 2014.
- [243] Las-Heras-Casas, J.; López-Ochoa, L.M.; López-González, L.M.; Paredes-Sánchez, J.P. A Tool for Verifying Energy Performance Certificates and Improving the Knowledge of the Residential Sector: A Case Study of the Autonomous Community of Aragón (Spain). *Sustain Cities Soc* **2018**, *41*, 62–72, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.016>.
- [244] Ministerio de Industria Energía y Turismo; Ministerio de Fomento. Factores de emisión de CO₂ y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector de edificios en España. Ministerio de Industria Energía y Turismo: Madrid, España, 2014.