

CENTROS DE DATOS · ANÁLISIS

RD DATA CENTER, ¿INJUSTO PARA ESPAÑA?

Influencia del clima en la eficiencia energética e hídrica de los centros de datos

Artículo redactado por: **José Jesús Arboledas**

Caloryfrio.com

La Comisión Europea reconoce que las condiciones climáticas locales desempeñan un papel relevante: las regiones frías se benefician del free cooling y las cálidas necesitan más energía para refrigerar.

También recuerda que la variabilidad meteorológica provoca oscilaciones estacionales del PUE. Esa observación debe trasladarse a la norma si el cumplimiento se evalúa anualmente.

Con este informe queremos sacar a la luz la incongruencia de tratar a toda la UE como un único clima, cosa que no se hace en otros parámetros como Rendimientos Estacionales, y PUE y WUE, son eso, Rendimientos Estacionales.

Un centro de datos transforma prácticamente toda la energía que consumen sus equipos informáticos en calor que debe evacuar de forma continua. La dificultad no termina en producir frío: hay que retirar ese calor con poco consumo auxiliar, limitar el uso de agua y mantener el servicio cuando las condiciones exteriores empeoran. Alcanzar simultáneamente un PUE de 1,15 y un WUE de 0,10 exige resolver las tres cuestiones dentro de un margen estrecho.

El clima interviene directamente en ese balance:

- la **temperatura exterior** condiciona el rechazo de calor
- la **humedad** modifica las posibilidades de algunas tecnologías
- la **persistencia del calor** puede prolongar el funcionamiento en condiciones desfavorables

Sin embargo, ninguno de estos factores permite deducir, por separado, el PUE o el WUE de una instalación. También cuentan la arquitectura, las temperaturas de trabajo, la carga informática y la estrategia de operación, por lo que la cuestión técnica es cuánto cambia el esfuerzo necesario para alcanzar unos mismos objetivos en emplazamientos distintos. Los datos analizados muestran diferencias relevantes entre las referencias europeas, españolas y andaluzas. Permiten identificar condicionantes de diseño y orientar la evaluación de proyectos, aunque no demuestran una imposibilidad general de cumplimiento en España.

Los objetivos y su contexto normativo

El proyecto de Real Decreto sometido a audiencia pública por MITECO entre agosto y septiembre de 2026 plantea, para los centros incluidos en su ámbito, requisitos de eficiencia energética e hídrica vinculados a la clase A del sistema europeo de etiquetado. Su régimen transitorio recoge valores máximos de **PUE de 1,15 y WUE de 0,10**. La propuesta sitúa el umbral general de aplicación en una potencia de acceso igual o superior a 1 MW, una magnitud distinta de la potencia IT instalada. [1]

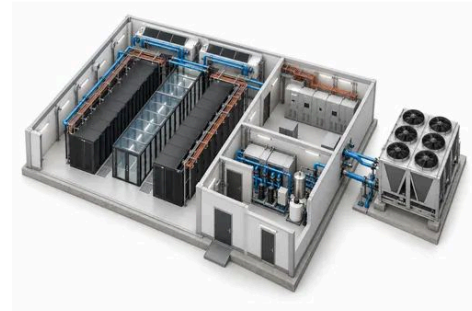
Este artículo analiza esos valores como objetivos de diseño a partir de la versión sometida a audiencia y conviene mantener esa referencia: **el contenido de un proyecto normativo no equivale a una obligación vigente y su aplicación final dependerá del texto aprobado**. El interés permanece, porque ambos límites obligan a estudiar conjuntamente el consumo de energía y la entrada de agua.

Eficiencia energética y eficiencia hídrica

7 clases. Dos calificaciones independientes.

De A (mejor) a G (peor), según cada indicador.

La energía de los equipos TI es el denominador común.



PUE ENERGÍA Sin unidades

Energía total del centro / energía de los equipos TI
Menor PUE = mejor clase

A	$PUE \leq 1,15$
B	$1,15 < PUE \leq 1,25$
C	$1,25 < PUE \leq 1,35$
D	$1,35 < PUE \leq 1,50$
E	$1,50 < PUE \leq 1,70$
F	$1,70 < PUE \leq 1,90$
G	$PUE > 1,90$

Clase A: hasta 1,15 kWh totales por cada kWh TI.

WUE AGUA L/kWh TI

Agua utilizada en el centro / energía de los equipos TI
Menor WUE = mejor clase

A	$WUE \leq 0,1$
B	$0,1 < WUE \leq 0,2$
C	$0,2 < WUE \leq 0,4$
D	$0,4 < WUE \leq 0,6$
E	$0,6 < WUE \leq 0,8$
F	$0,8 < WUE \leq 1,0$
G	$WUE > 1,0$

Clase A: hasta 0,1 litros de agua por cada kWh TI.

DOS RESULTADOS PARA UN MISMO CENTRO

Una A en energía no implica una A en agua.

EJEMPLO

PUE 1,12 → A

WUE 0,30 → C

Fuente: C(2026) 3472 final · Anexo I, cuadros 1 y 2. Desarrollo del art. 33.3 de la Directiva (UE) 2023/1791.
TI: tecnologías de la información. Representación didáctica de la clasificación; no reproduce la etiqueta oficial.

Qué margen dejan PUE y WUE

El PUE relaciona la energía total que utiliza el centro con la energía de sus equipos de tecnologías de la información, o equipos IT. Estos incluyen servidores, almacenamiento y comunicaciones. El WUE relaciona el aporte de agua al perímetro del centro con la energía IT del mismo periodo. El Reglamento Delegado (UE) 2024/1364 establece sus definiciones y métodos de cálculo. [2]

Power Usage Effectiveness (PUE)

Se define el PUE como la relación entre el consumo energético total del Data Center y el consumo energético de los equipos de tecnologías de la información (EIT):

$$PUE = EDC / EIT$$

Un valor inferior indica menor consumo auxiliar por unidad de energía IT.

El indicador incorpora refrigeración, conversión y distribución eléctrica, iluminación y demás consumos de apoyo comprendidos dentro del límite del centro.

Water Usage Effectiveness (WUE)

El WUE relaciona el consumo total de agua (WIN) del Data Center con el consumo energético IT del mismo expresado en MWh:

$$WUE = WIN / EIT$$

La unidad utilizada es m³/MWh, numéricamente equivalente a L/kWh.

Un valor inferior representa menor entrada directa de agua por unidad de energía IT.

En el PUE, ambas energías deben expresarse en la misma unidad. Para el WUE europeo, el aporte de agua se expresa en metros cúbicos y la energía IT en MWh: $1\text{m}^3/\text{MWh}$ equivale numéricamente a 1 L/kWh . El periodo y los límites de medición deben ser coherentes. Se trata de indicadores de uso de recursos; su cálculo anual incorpora la variación estacional, pero no los convierte en rendimientos estacionales equivalentes a SEER o SCOP.

Un PUE de 1,15 deja 0,15 kWh de consumo auxiliar por cada kWh IT. Refrigeración, ventilación, bombeo, pérdidas eléctricas, iluminación y otros servicios comparten ese margen. Asignarlo por completo a la instalación térmica conduciría a una selección equivocada desde el primer balance.

Un ejemplo permite dimensionar el problema. Si la carga IT media anual fuera de 1 MW durante 8.760 horas, consumiría 8.760 MWh. Con PUE 1,15, el consumo auxiliar anual máximo sería de 1.314 MWh, equivalente a 150 kW medios. Con WUE 0,10, el aporte anual de agua sería de 876 m^3 . Son magnitudes anuales: no constituyen límites instantáneos de potencia o caudal.

El reparto de esos 150 kW medios depende del proyecto. Si, en un supuesto ilustrativo, las pérdidas eléctricas y los servicios no térmicos sumasen 50 kW medios, quedarían 100 kW medios para refrigeración y sus auxiliares. El ejemplo no presupone una solución concreta; muestra por qué la evaluación debe comenzar con un presupuesto energético completo.

La ocupación también modifica el resultado. Con 100 kW de consumos auxiliares constantes, una carga IT de 1.000 kW arrojaría una relación de potencias de 1,10; con 500 kW IT, esa relación sería 1,20. En una instalación real parte de los auxiliares varía con la carga, pero los consumos fijos explican por qué un centro en fase de llenado puede presentar un PUE peor sin haber cambiado de clima ni de equipos.

A ello se suma la disponibilidad exigida. La redundancia, los equipos en espera, el reparto de carga y las condiciones durante mantenimiento o avería afectan al consumo. Comparar centros exige conocer estas diferencias. Un buen valor anual tampoco demuestra, por sí solo, que la instalación conserve capacidad suficiente en la condición exterior de diseño.

Qué cabe en un PUE de 1,15

Un ejemplo anual · 1 MW IT medio · 8.760 horas

01 EL BALANCE ANUAL

ENERGÍA IT

8.760 MWh

MÁXIMO AUXILIAR

1.314 MWh

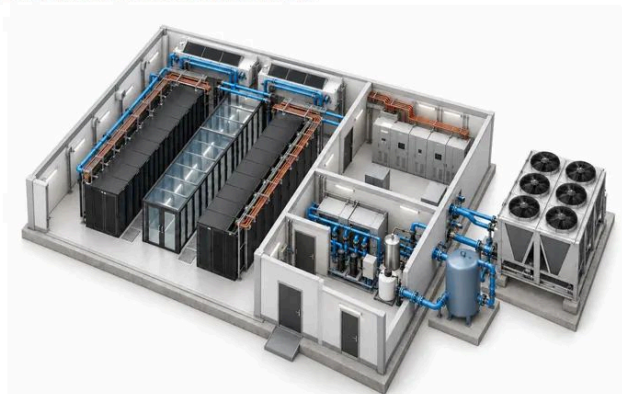
MÁXIMO DE AGUA

876 m³

PUE 1,15: 10.074 MWh totales/año

WUE 0,10 L/kWh IT: 876.000 L/año

02 REPARTIR EL MARGEN AUXILIAR



150 kW medios anuales

1.314 MWh / 8.760 h

REPARTO ILUSTRATIVO



50 kW Pérdidas eléctricas y servicios no térmicos

100 kW Refrigeración y sus auxiliares

El reparto depende del proyecto.

No presupone una tecnología concreta.

El presupuesto debe incluir todos los consumos, no solo la refrigeración.

03 LA OCUPACIÓN CAMBIA EL RESULTADO

Supuesto distinto: 100 kW auxiliares constantes en ambos casos.

1.000 kW IT + 100 kW auxiliares

Relación de potencias **1,10**

500 kW IT + 100 kW auxiliares

Relación de potencias **1,20**

Son relaciones de potencias; coinciden con el PUE anual si se mantienen durante todo el año.

En la práctica, parte de los auxiliares varía con la carga. Los consumos fijos penalizan el llenado.

04 EFICIENCIA ANUAL ≠ CAPACIDAD DISPONIBLE

150 kW medios y 876 m³/año no son límites instantáneos de potencia ni de caudal.

Redundancia, espera, reparto de carga, mantenimiento y averías también afectan al consumo.

Un buen PUE anual no acredita capacidad suficiente en la condición exterior de diseño.

Ejemplo ilustrativo · Año de 365 días · IT: tecnologías de la información · Comparar centros exige conocer su operación.

Qué muestran los datos europeos

El informe de 2025 de la Comisión Europea constituye la referencia estadística de las comparaciones siguientes. Su primera campaña reunió aproximadamente el 36 % del número estimado de centros identificado por los autores, con participación desigual entre países. Es una muestra del parque declarado, no un inventario exhaustivo ni una fotografía de todos los proyectos nuevos. [3]

En las agregaciones utilizadas, el PUE medio ponderado europeo es 1,36 y el WUE es 0,58 m³/MWh. La base del PUE incluye 681 centros con datos energéticos válidos; la del WUE incluye 457 centros con entrada de agua distinta de cero. Por ello, ambos promedios no describen exactamente la misma población y el WUE no representa a todos los centros, incluidos los que declararon cero.

Figura 1 PUE medio por país en la muestra de referencia

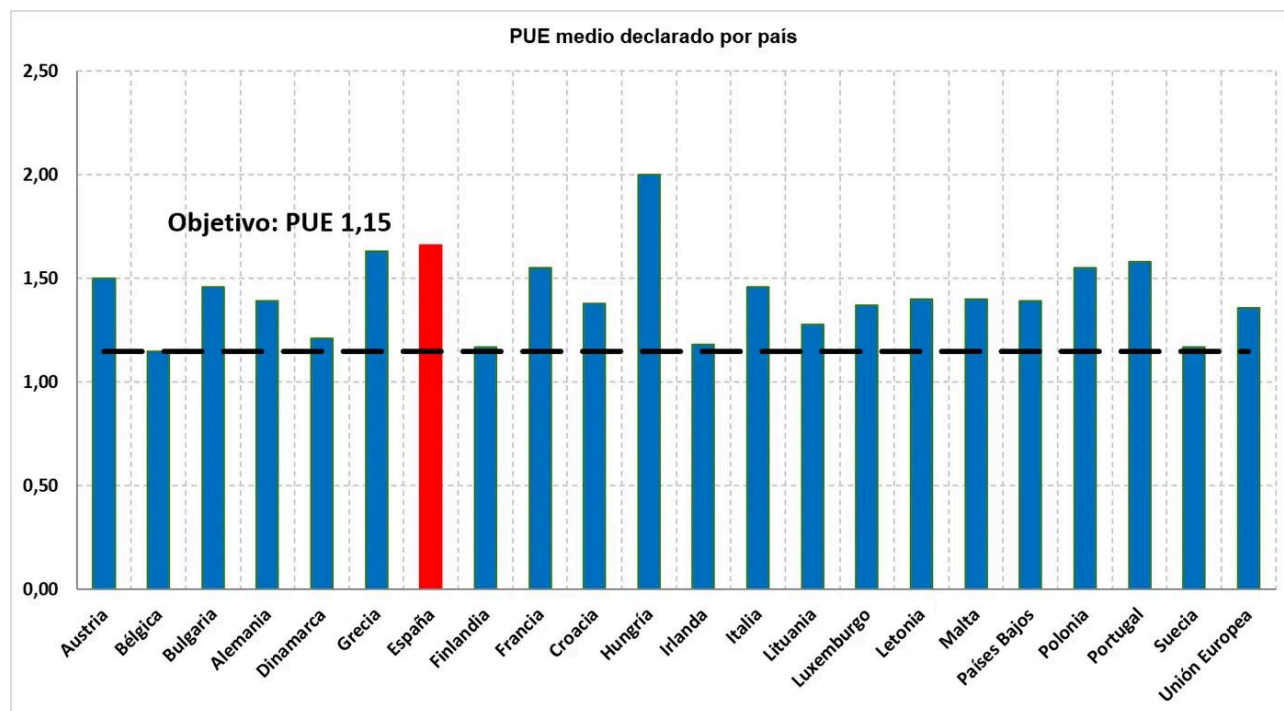
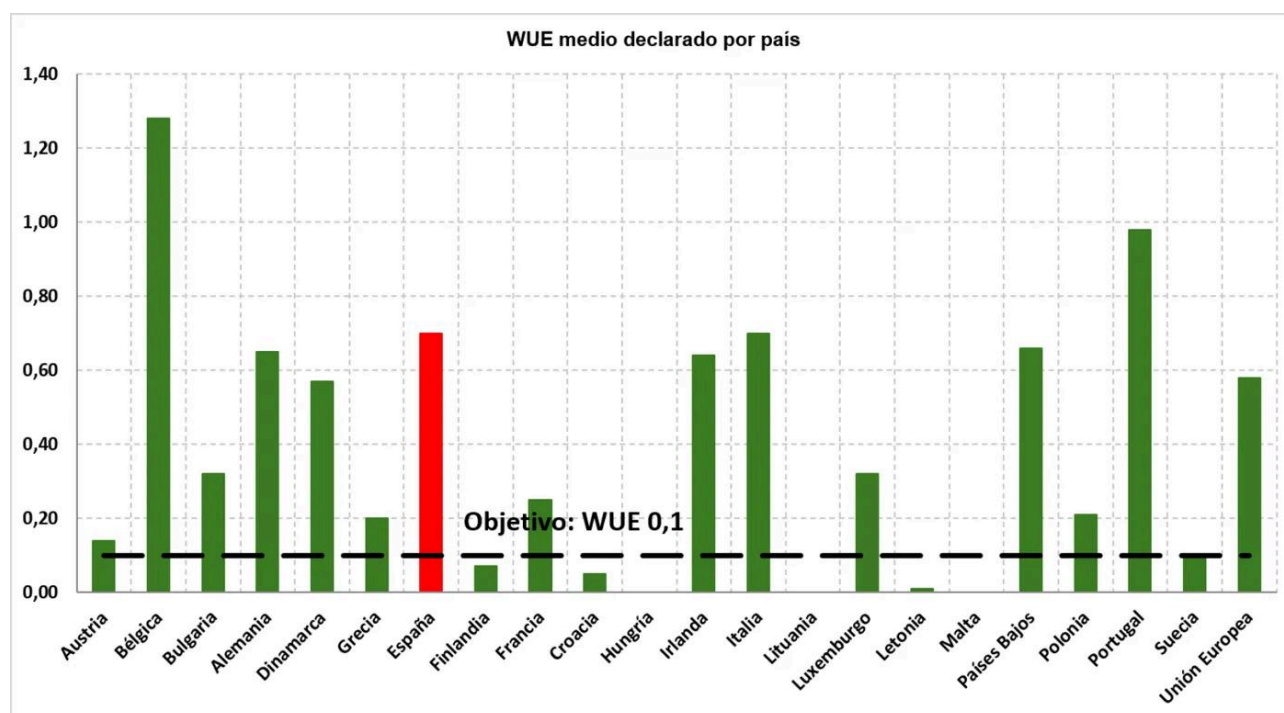


Figura 2 WUE medio por país en la muestra de referencia



La muestra española presenta un PUE de 1,66 y un WUE de 0,70. La distancia respecto a 1,15 y 0,10 permite apreciar la exigencia de los objetivos. No permite atribuir toda esa distancia al clima: edad, tamaño, carga y tecnología también influyen. Tampoco demuestra que una nueva instalación optimizada deba reproducir el comportamiento del parque existente.

Tabla 1 Resumen de indicadores y magnitudes declaradas

Indicador	Resultado	España	Base y tratamiento
PUE medio ponderado UE	1,36	36	681 centros con EDC y EIT
WUE medio ponderado UE	0,58 m ³ /MWh	101,03 MW	457 centros con WIN distinto de cero
Potencia IT instalada declarada	3.738,86 MW	603,63 GWh	Suma de los centros incluidos en el reporte
Consumo energético total	14.088 GWh	214.501 m ³	Energía total anual declarada por los centros
Entrada total de agua	6.223.391 m ³	1,66	Agua total declarada por los centros.

Lectura de la tabla: la columna España no mantiene la correspondencia por filas con los indicadores europeos. El valor 36 corresponde al número de centros de una agregación; 101,03 MW, a potencia IT; 603,63 GWh, a energía; 214.501 m³, a agua; y 1,66, a PUE. No deben compararse horizontalmente como magnitudes equivalentes. La tabla conserva su contenido original.

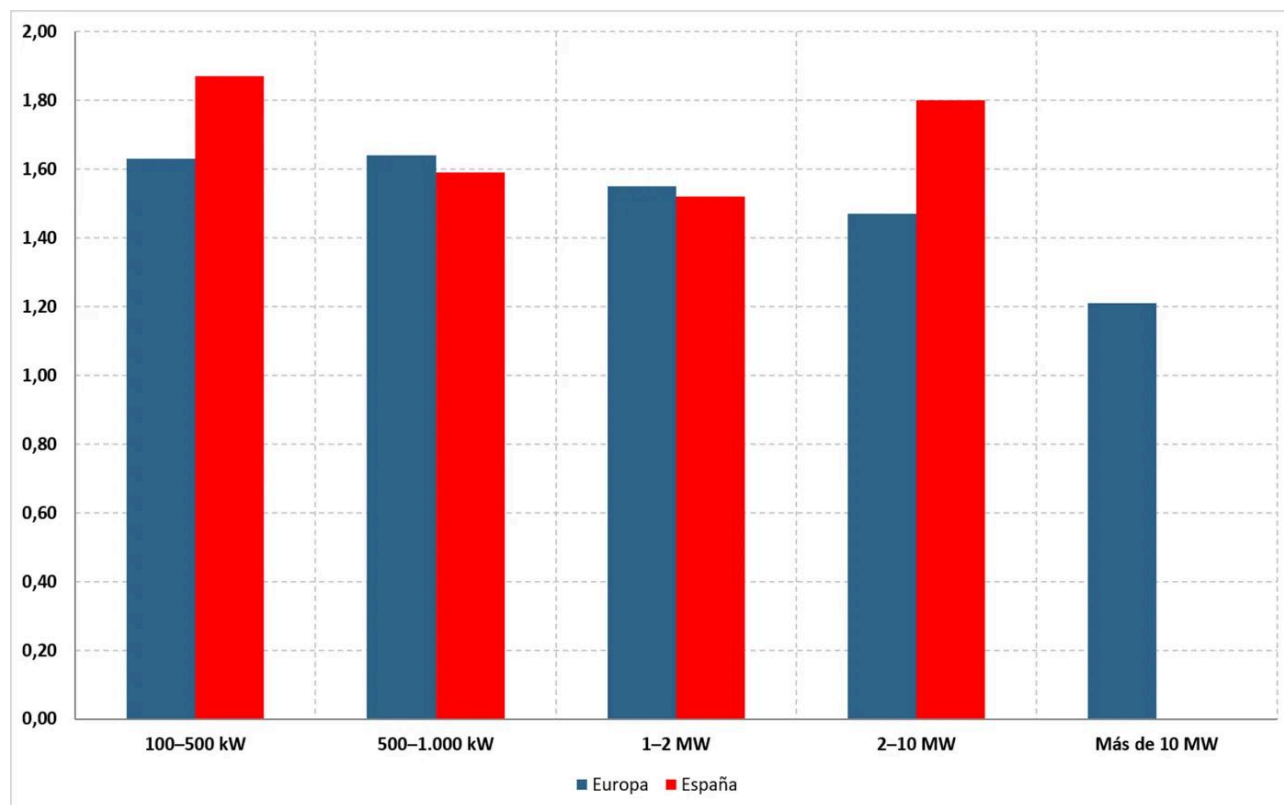
Tamaño y modelo de explotación

La comparación por potencia IT ayuda a interpretar la dispersión. En el conjunto europeo, el tramo de más de 10 MW muestra un PUE inferior al de los tramos pequeños. Ese patrón no convierte el tamaño en una causa suficiente: una escala mayor puede facilitar determinadas soluciones, pero no garantiza su rendimiento en cualquier emplazamiento.

Tabla 2 PUE por potencia IT instalada

Potencia IT	Europa	España
100–500 kW	1,63	1,87
500–1.000 kW	1,64	1,59
1–2 MW	1,55	1,52
2–10 MW	1,47	1,80
Más de 10 MW	1,21	<i>No publicado</i>

Figura 3 Comparación de PUE por tamaño entre Europa y España

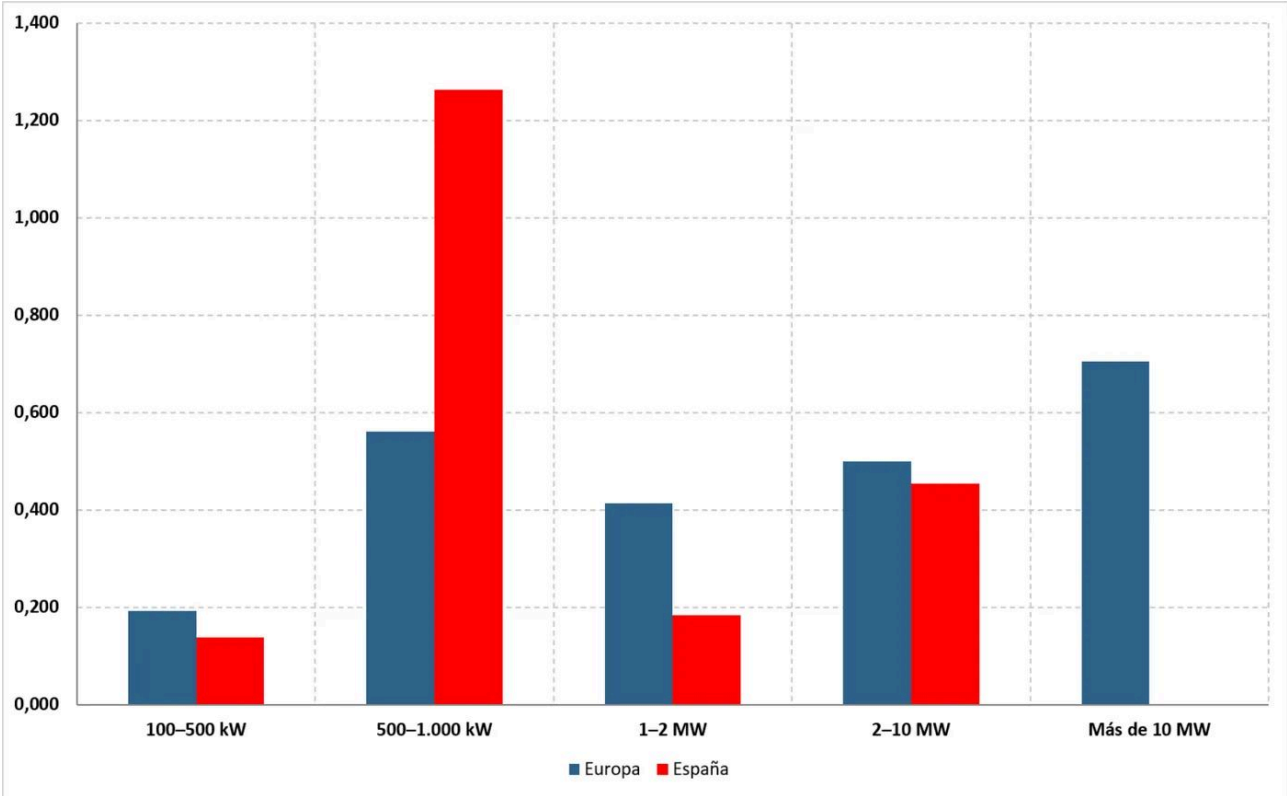


Los resultados españoles publicados tampoco siguen una progresión uniforme. Esto aconseja evitar reglas como asignar un PUE esperado únicamente a partir de la potencia instalada. La ausencia de un valor publicado en una categoría no significa ausencia de instalaciones ni un indicador nulo.

Tabla 3 WUE por potencia IT instalada

Potencia IT	Europa	España
100-500 kW	0,193	0,138
500-1.000 kW	0,561	1,262
1-2 MW	0,413	0,183
2-10 MW	0,499	0,454
Más de 10 MW	0,705	No publicado

Figura 4 Comparación de WUE por tamaño entre Europa y España

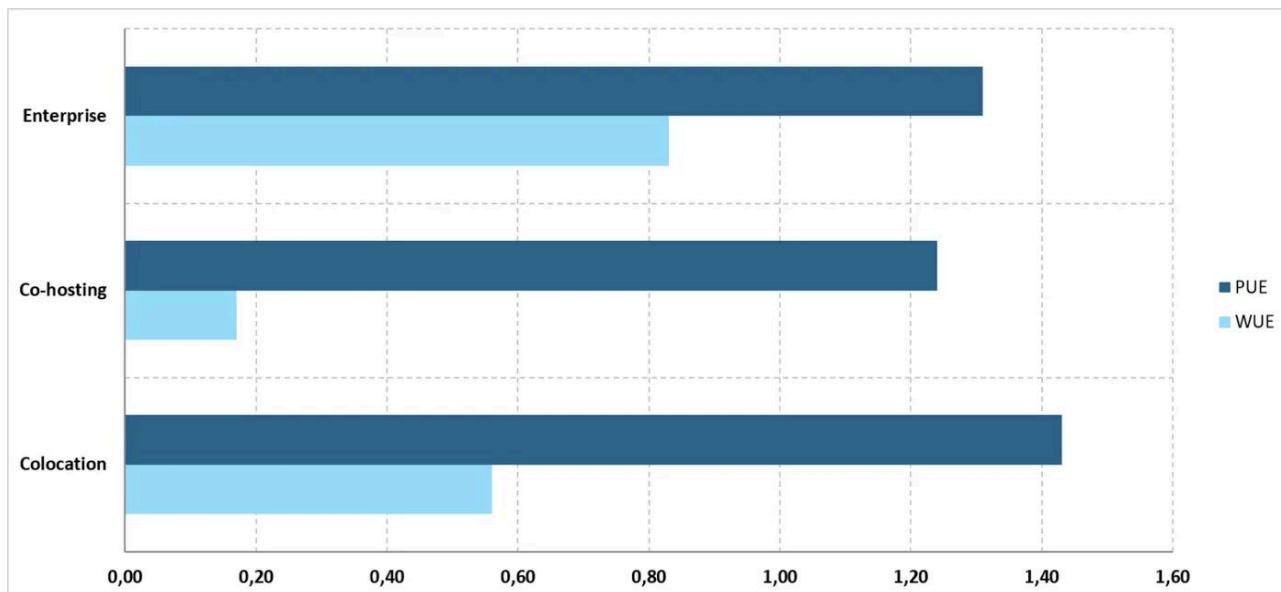


El modelo de explotación introduce otra diferencia. En colocation, el operador proporciona infraestructura para equipos de clientes; en co-hosting, el servicio comprende también recursos informáticos gestionados por el proveedor; en enterprise, la organización utiliza el centro para sus propias necesidades. Estas categorías describen modelos de servicio, no tecnologías de refrigeración.

Tabla 4 PUE y WUE por tipología de centro

Tipología	PUE	WUE (WIN > 0)
Colocation	1,43	0,56
Co-hosting	1,24	0,17
Enterprise	1,31	0,83
Total de la muestra	1,36	0,58

Figura 5 Comparación por tipología en la muestra europea



El clima entra por el rechazo de calor

La refrigeración de un centro de datos presenta una particularidad frente a muchos edificios: la carga interna puede mantenerse elevada durante todo el año. Incluso cuando fuera hace frío, los equipos IT siguen generando calor. El descenso de temperatura exterior ofrece entonces una oportunidad para evacuarlo con menos trabajo de compresión, siempre que la instalación pueda aprovecharla.

En un sistema de compresión con condensación por aire, el aumento de la temperatura exterior tiende a elevar la temperatura de condensación para mantener la transferencia de calor. Si se mantienen las demás condiciones, el compresor necesita más trabajo y la capacidad disponible puede disminuir. Las curvas del fabricante permiten cuantificar ambos efectos; una temperatura media anual no los describe.

Los auxiliares requieren su propio análisis. Un ventilador regulado puede aumentar su velocidad para sostener el intercambio, mientras una bomba de caudal constante puede consumir prácticamente lo mismo. Afirmar que todos los ventiladores y todas las bombas aumentan automáticamente su consumo con la temperatura exterior simplifica demasiado el funcionamiento real.

Los grados-día de refrigeración, conocidos como CDD, ayudan a comparar el contexto climático. Eurostat suma la diferencia entre la temperatura media diaria y 21 °C cuando dicha media alcanza al menos 24 °C. Ese índice caracteriza condiciones meteorológicas; no calcula la energía de un centro de datos. [4]

Figura 6 Comparación del índice de grados-día de refrigeración

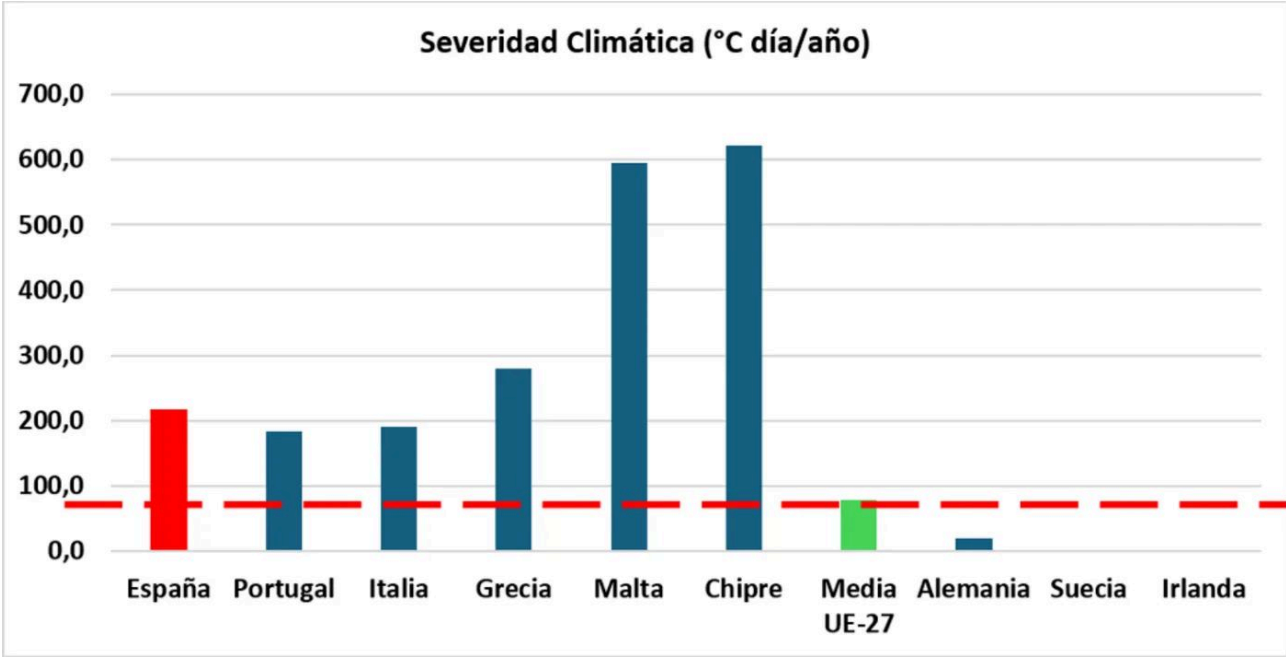


Tabla 5 Valores de referencia del índice climático

País / referencia	Valor
Chipre	621,6
Malta	594,2
Grecia	278,9
España	217,0
Italia	190,7
Portugal	184,4
Media UE-27	78,7
Alemania	19,5
Suecia	0,4
Irlanda	0,0

Tabla 6 Comparación de CDD entre los ámbitos analizados

Ámbito	CDD medio	Relación con UE	Exceso frente a UE
UE-27	78,7	1,00	—
España	217,0	2,76 veces	+175,8 %
Andalucía	391,4	4,97 veces	+397,3 %

En la comparación aportada, el índice español es aproximadamente 2,76 veces el europeo y el andaluz, 4,97 veces. Estas relaciones pertenecen al índice CDD. No significan que un centro español consuma 2,76 veces más energía de refrigeración, ni proporcionan un coeficiente con el que corregir directamente el PUE.

La escala territorial importa

Los mapas permiten localizar contrastes amplios, pero una frontera administrativa no define las condiciones de una parcela. Costa, altitud, entorno urbano y posición respecto a los relieves pueden producir diferencias relevantes dentro de una misma comunidad autónoma.

Figura 7 Distribución del índice climático en Europa

SEVERIDAD CLIMÁTICA PARA LA REFRIGERACIÓN EN LA UNIÓN EUROPEA

Promedio anual de grados-día de refrigeración (CDD), periodo climático 1991-2020

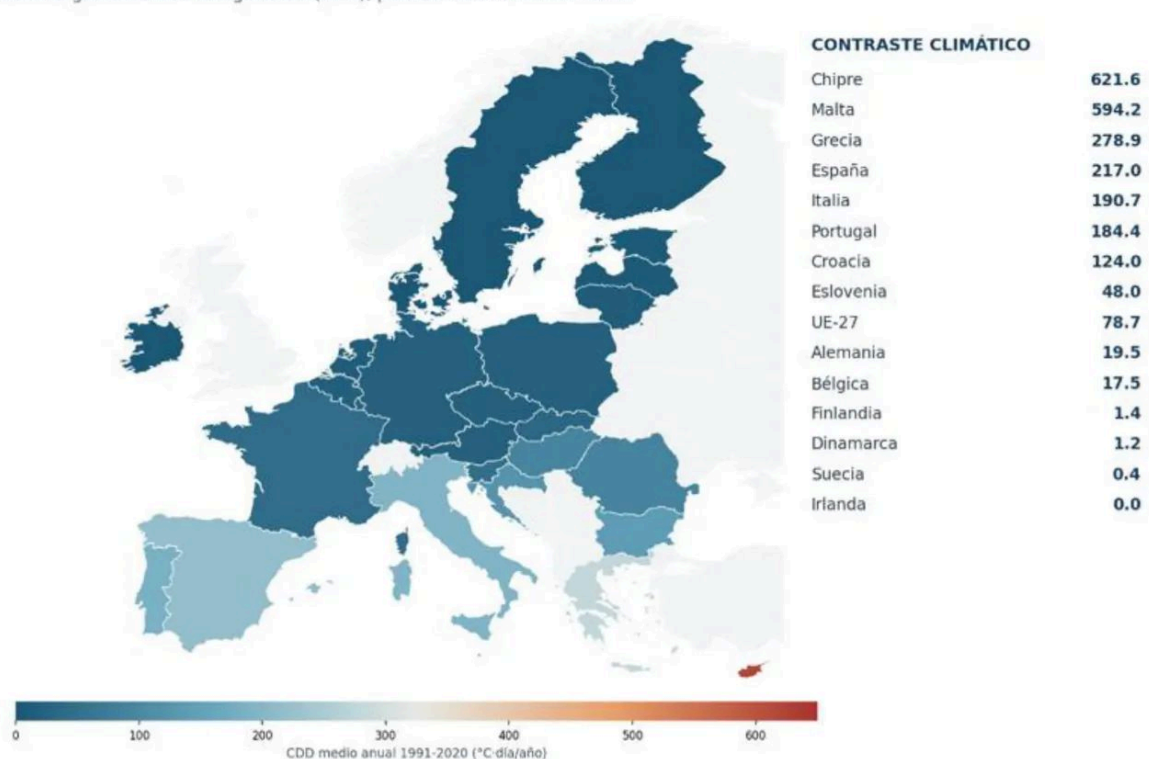
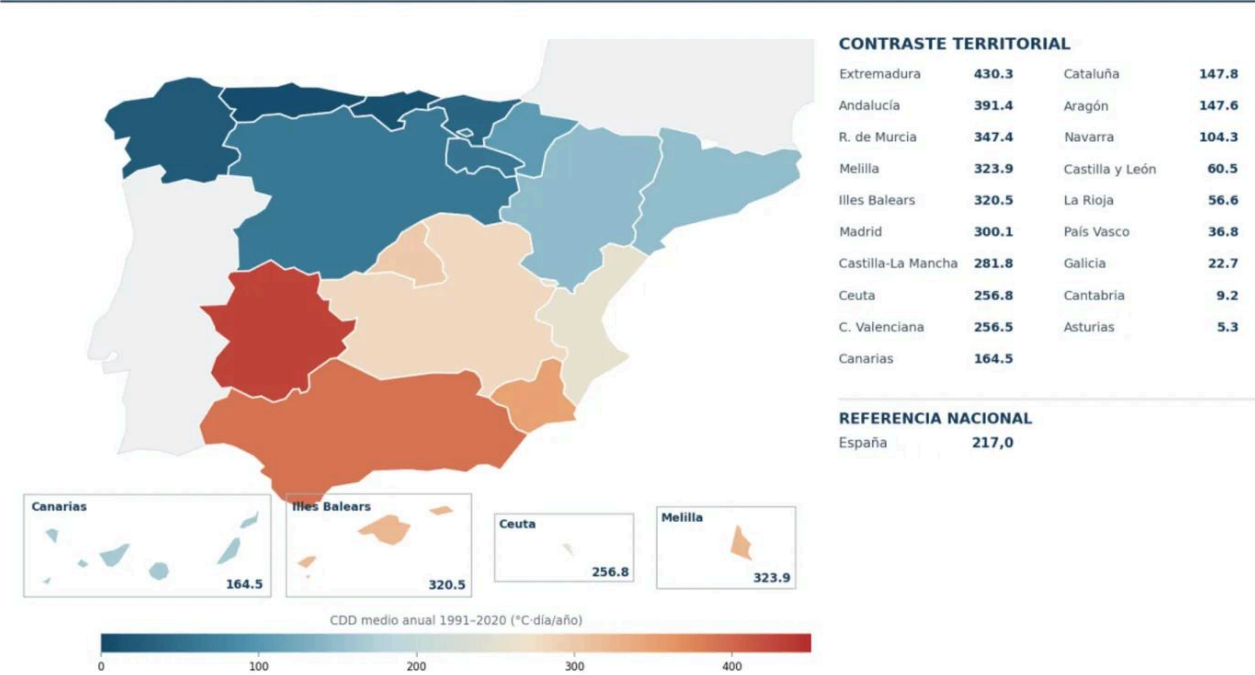


Figura 8 Distribución del índice climático en España

SEVERIDAD CLIMÁTICA PARA LA REFRIGERACIÓN EN ESPAÑA

Promedio anual de grados-día de refrigeración (CDD) · periodo climático 1991-2020



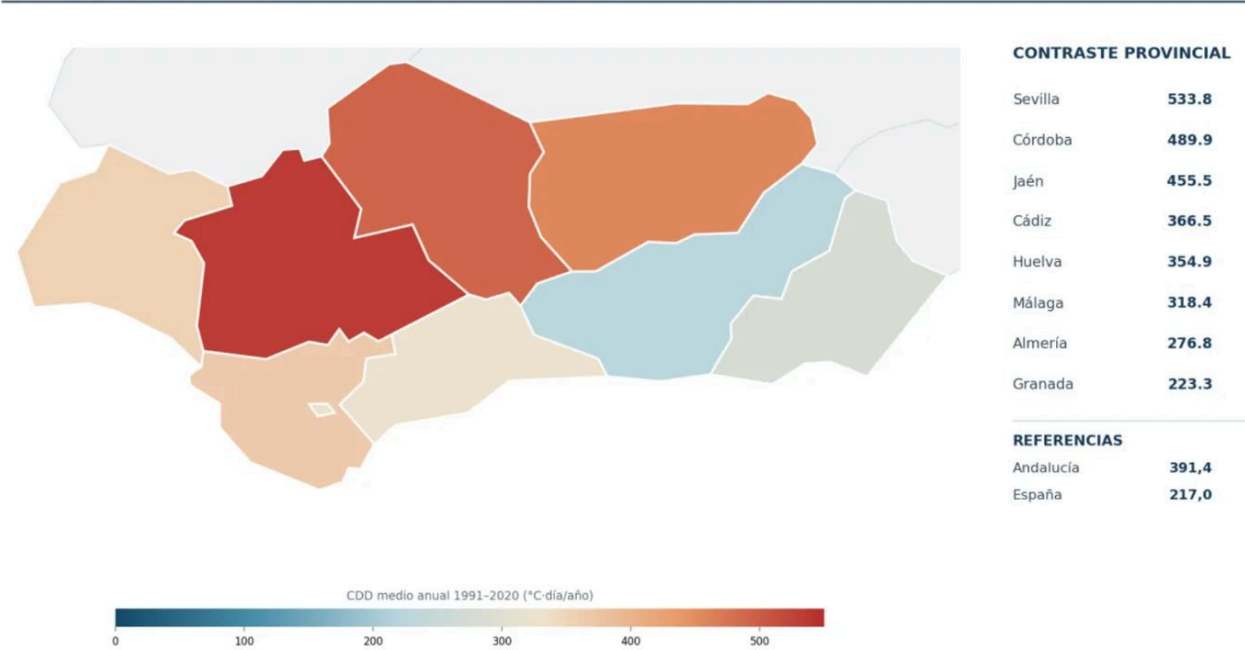
Metodología Eurostat: si la temperatura media diaria $T_m \geq 24\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{CDD} = T_m - 21\text{ }^{\circ}\text{C}$; en otro caso, $\text{CDD} = 0$. Media de 30 valores anuales.

Datos: Eurostat/JRC, nrg_chddr2_a (NUTS 2), actualización 8-05-2026. Cartografía: Eurostat GISCO, NUTS 2024. Cálculo: media aritmética 1991-2020.

Figura 9 Distribución del índice climático en Andalucía

SEVERIDAD CLIMÁTICA PARA LA REFRIGERACIÓN EN ANDALUCÍA

Promedio anual de grados-día de refrigeración (CDD) por provincia · periodo climático 1991-2020



Metodología Eurostat: si la temperatura media diaria $T_m \geq 24\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{CDD} = T_m - 21\text{ }^{\circ}\text{C}$; en otro caso, $\text{CDD} = 0$. Media de 30 valores anuales.

Datos: Eurostat/JRC, nrg_chddr2_m (NUTS 3), actualización 8-05-2026. Cartografía: Eurostat GISCO, NUTS 2024. Agregación mensual → anual → media 1991-2020.

La comparación climática resulta útil para seleccionar emplazamientos y detectar riesgos. El diseño necesita después series locales y condiciones de cálculo identificadas. Los mapas

presentan el periodo 1991–2020 y agregaciones por país, comunidad y provincia. Aun con esa base común, el índice no proporciona por sí solo un factor reglamentario de normalización del PUE.

Calor persistente y capacidad disponible

La energía anual y la seguridad térmica plantean preguntas distintas. La primera pregunta cuánto consume el sistema durante todo el año. La segunda comprueba si mantiene la carga crítica cuando coinciden temperaturas elevadas, mantenimiento o una contingencia. Un centro puede obtener un buen promedio anual y conservar poco margen durante las horas más exigentes.

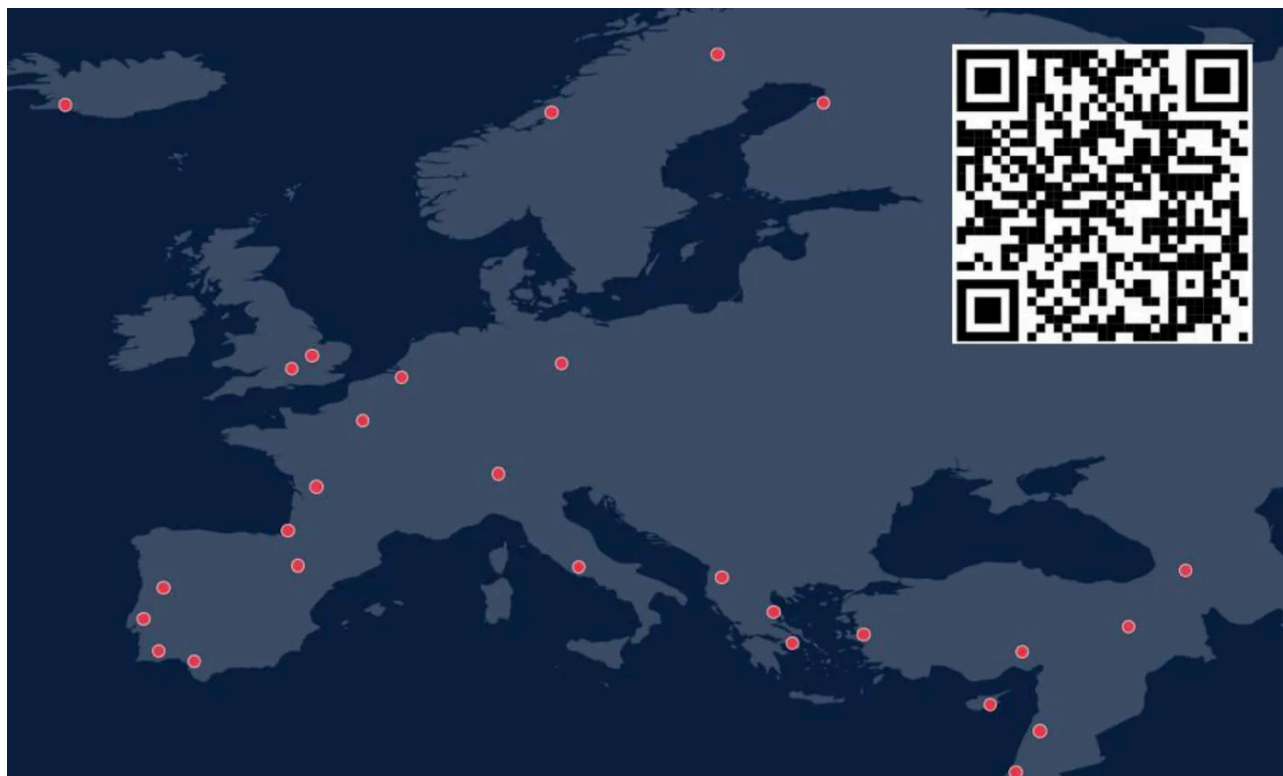
Para estudiar la persistencia del calor, el análisis utiliza un indicador explícito: días incluidos en secuencias de al menos tres jornadas consecutivas con temperatura máxima diaria igual o superior a 35 °C, durante 1991–2020. No debe confundirse con la definición de ola de calor de AEMET, que combina duración, extensión geográfica y umbrales relativos a la climatología de las estaciones. [5]

La media simple de las ubicaciones de referencia es de 3,7 días al año para las 27 capitales europeas, 11,0 para las 19 referencias españolas y 26,4 para las ocho capitales andaluzas. Son medias entre ubicaciones; no equivalen a promedios de toda la superficie de esos territorios ni a medias ponderadas por potencia IT.

Tabla 7 Ámbitos y referencias del análisis de episodios persistentes

Ámbito	Ubicaciones	Días/año ≥ 35 °C en episodios ≥ 3 días	Índice frente UE
UE-27	27 capitales nacionales	3,7	1
España	19 capitales autonómicas	11	3
Andalucía	8 capitales provinciales	26,4	7,2

Figura 10 Visualización cartográfica complementaria de episodios cálidos



Una secuencia de máximas elevadas tampoco prueba que desaparezca el alivio nocturno. Para determinarlo hay que estudiar temperaturas mínimas y horas nocturnas, además de las máximas. Esta distinción evita confundir dos riesgos que pueden coincidir, pero no son idénticos.

Comparación de los emplazamientos

Los mapas y tablas siguientes mantienen los rótulos del material gráfico original. Donde indican olas de calor, el criterio utilizado en este análisis es el umbral absoluto de 35 °C y la duración mínima de tres días. La denominación del territorio identifica la ubicación empleada como referencia, no una medición uniforme sobre toda su superficie.

En la tabla europea, España corresponde a Madrid y registra 17,0 días al año. Ese valor no contradice los 11,0 días de la media de las 19 referencias españolas: describen conjuntos diferentes. La misma cautela afecta al rótulo Andalucía de la tabla nacional, que utiliza Sevilla como referencia.

Figura 11 Episodios persistentes en las referencias europeas

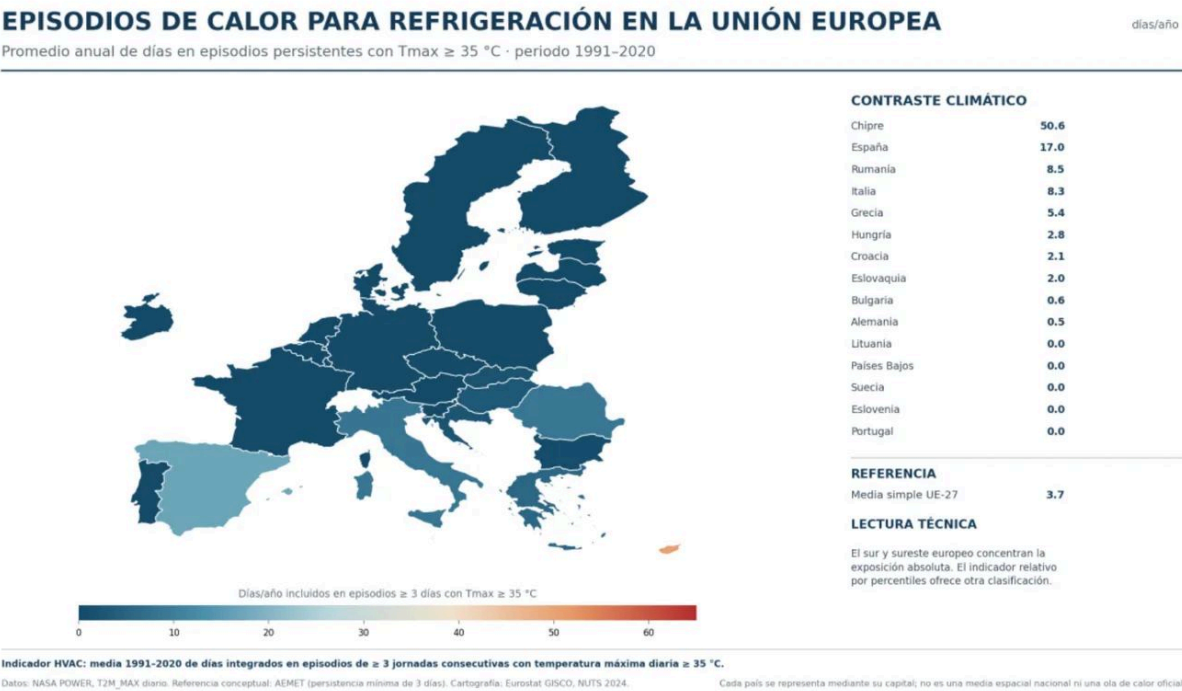


Tabla 8 Resultados de las ubicaciones europeas representadas

Territorio de referencia	Días/año	Episodios/año	Máxima racha
Chipre	50,6	6,13	50
España	17,0	3,53	18
Rumanía	8,5	2,07	10
Italia	8,3	1,57	12
Grecia	5,4	1,40	8
Hungría	2,8	0,53	10
Croacia	2,1	0,47	7
Eslovaquia	2,0	0,47	10
Bulgaria	0,6	0,13	6
Alemania	0,5	0,13	5

Figura 12 Episodios persistentes en las referencias españolas

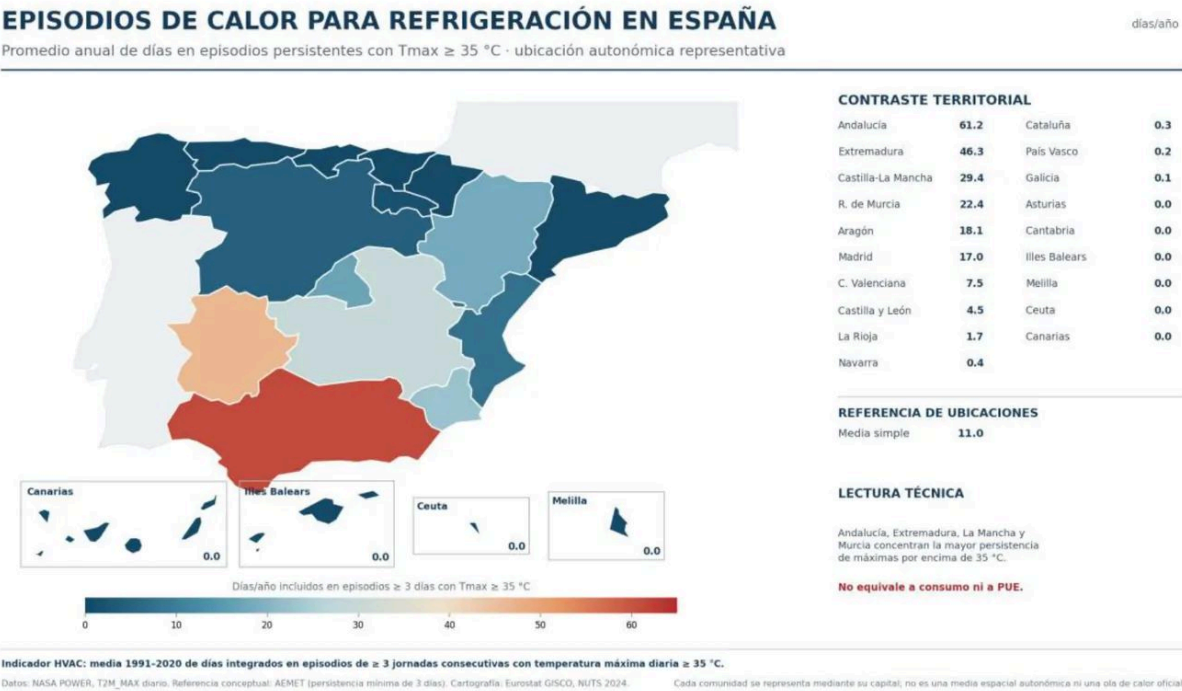


Tabla 9 Resultados de las ubicaciones españolas representadas

Referencia	Días/año	Referencia	Días/año
Andalucía	61,2	Cataluña	0,3
Extremadura	46,3	País Vasco	0,2
Castilla-La Mancha	29,4	Galicia	0,1
R. de Murcia	22,4	Asturias	0,0
Aragón	18,1	Cantabria	0,0
Madrid	17,0	Illes Balears	0,0
C. Valenciana	7,5	Melilla	0,0
Castilla y León	4,5	Ceuta	0,0
La Rioja	1,7	Canarias	0,0
Navarra	0,4		

El detalle andaluz muestra contrastes que una sola cifra regional ocultaría. La serie de referencia asigna a Sevilla 61,2 días al año incluidos en episodios, frente a valores mucho menores en otras capitales. Los datos proceden del tratamiento de rejillas de NASA POWER descrito en el análisis; no deben presentarse como observaciones directas de una estación urbana. [6]

Figura 13 Episodios persistentes en las capitales andaluzas

EPISODIOS DE CALOR PARA REFRIGERACIÓN EN ANDALUCÍA

Promedio anual de días en episodios persistentes con Tmax ≥ 35 °C · ubicación provincial representativa

días/año

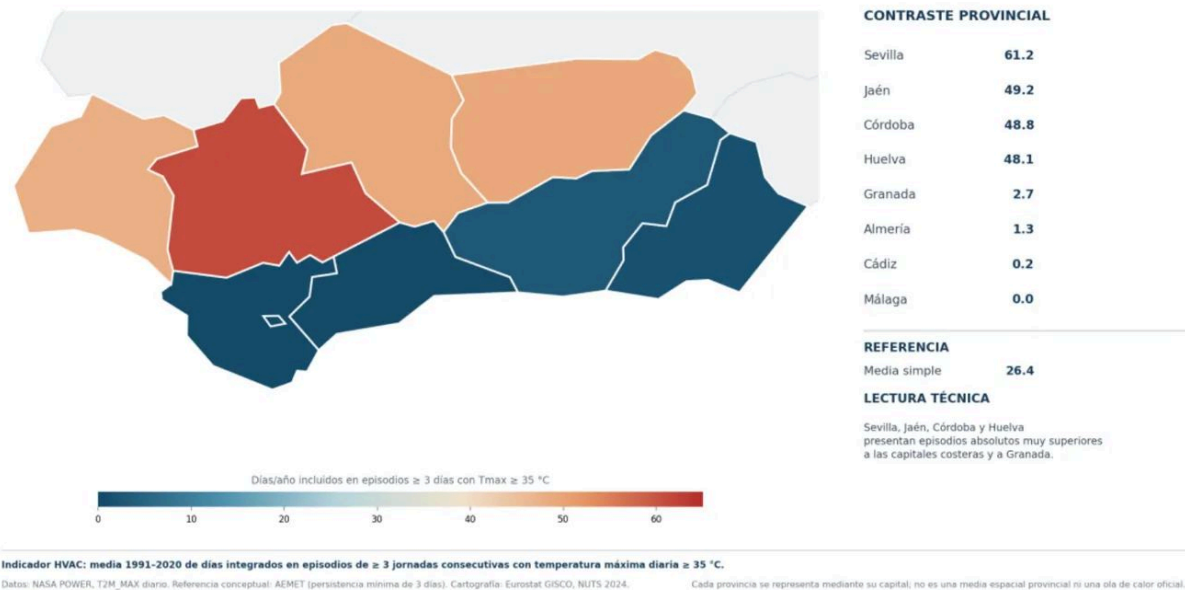


Tabla 10 Detalle de episodios y noches cálidas en las capitales andaluzas

Capital provincial	Días/año en rachas	Episodios/año	Días totales ≥35 °C	Noches ≥20 °C
Sevilla	61,2	6,93	66,2	39,9
Jaén	49,2	6,10	53,4	32,5
Córdoba	48,8	5,83	53,4	29,7
Huelva	48,1	6,30	54,7	34,3
Granada	2,7	0,77	6,1	37,5
Almería	1,3	0,40	3,7	36,0
Cádiz	0,2	0,07	1,3	72,1
Málaga	0,0	0,00	0,0	83,0

La columna de noches con temperatura igual o superior a 20 °C aporta información complementaria. En la comparación aparecen ubicaciones costeras con pocos días de máxima extrema y numerosas noches cálidas. Para el rechazo de calor, esas noches pueden reducir las oportunidades de economización, aunque la máxima diurna no alcance 35 °C.

Tabla 11 Síntesis de días episodios y rachas de las muestras

Territorio de referencia	Días/año	Episodios/año	Máxima racha
Unión Europea	3,7	0,6	50
España	11,0	1,8	43
Andalucía	26,4	3,3	49

Figura 14 Promedio anual de días incluidos en episodios persistentes

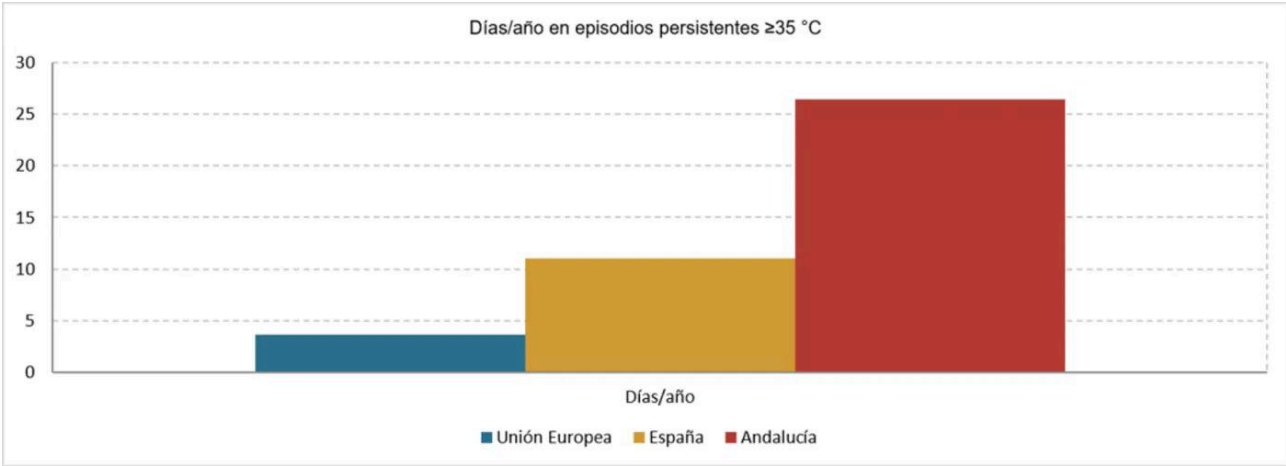


Figura 15 Promedio anual del número de episodios

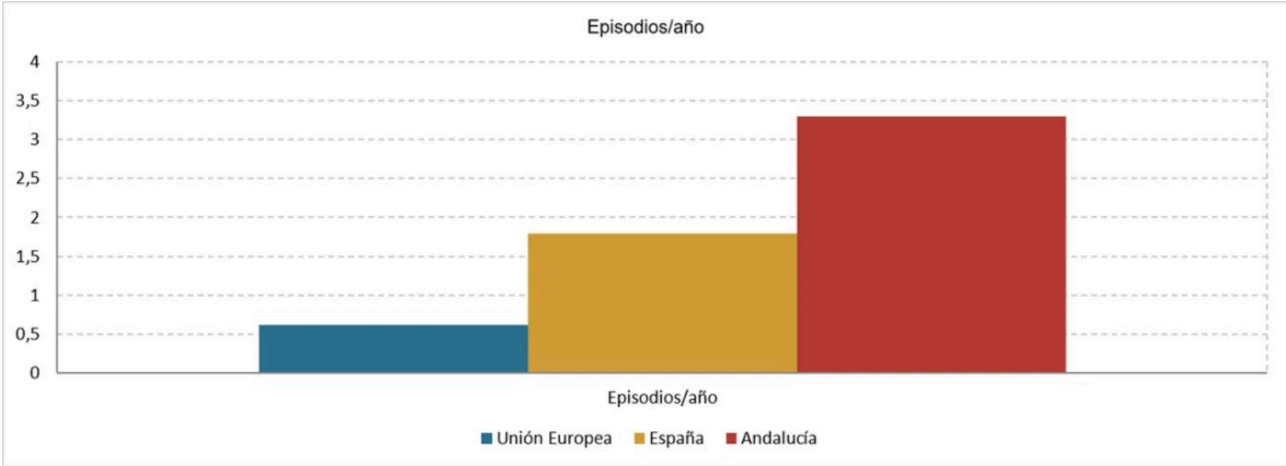


Figura 16 Máxima racha observada en cada conjunto

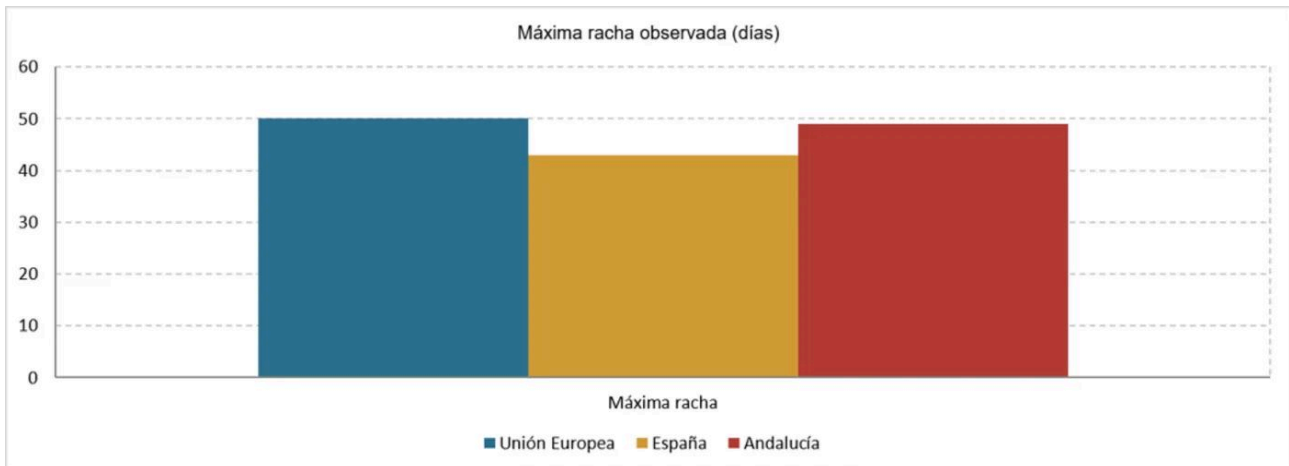


Figura 17 Resumen gráfico de la comparación entre ámbitos



Días al año, episodios al año y máxima racha miden cosas distintas. Los dos primeros resumen una frecuencia media; la racha máxima recoge un extremo observado. Una referencia europea con pocos días medios puede contener una ubicación con una racha extrema larga. No procede convertir esos indicadores en un porcentaje de sobreconsumo sin modelar la instalación.

Cuántas horas puede aprovechar el free-cooling

El free-cooling utiliza condiciones exteriores favorables para evacuar calor sin compresión mecánica, o con un apoyo parcial de esta. No significa refrigeración sin consumo: siguen funcionando ventiladores, bombas y controles. Su interés consiste en reducir la energía necesaria para retirar una carga térmica determinada.

La disponibilidad real depende de la arquitectura. Un economizador de aire utiliza aire exterior, normalmente con filtración y mezcla. Un sistema indirecto mantiene separados los flujos de aire.

En un circuito hidráulico con rechazo seco, la temperatura exterior debe permitir enfriar el agua hasta la consigna requerida, teniendo en cuenta los acercamientos térmicos de los intercambiadores.

Por eso, contar horas con temperatura exterior inferior a 20 °C no equivale a contar horas garantizadas de funcionamiento sin compresores. El mismo aire exterior puede resultar suficiente para un circuito de agua a temperatura elevada e insuficiente para otro que necesite una impulsión más fría. También importa cuánta potencia puede evacuar el equipo en esas condiciones.

El análisis utiliza umbrales de 18, 20 y 22 °C como cribado climático. Se apoya en años meteorológicos típicos de JRC-PVGIS 5.3 basados en ERA5, seleccionados dentro de 2005–2023. Un año típico representa condiciones habituales; no sustituye el análisis de extremos para dimensionar la instalación. [7]

Tabla 12 Construcción de las referencias para el análisis horario

Referencia	Construcción
Europa	21 ubicaciones representativas, ponderadas por la potencia IT declarada por cada Estado en la tabla 24 del informe europeo de 2025.
España	Madrid como proxy de localización del principal mercado español. No representa automáticamente todos los emplazamientos nacionales.
Andalucía	Media simple de las ocho capitales provinciales. Se utiliza como indicador territorial; no como distribución prevista de potencia IT.

El referente europeo combina 21 ubicaciones ponderadas por la potencia IT declarada por cada Estado en la referencia utilizada. España corresponde a Madrid. Andalucía corresponde a la media simple de sus ocho capitales. Esta construcción debe acompañar a cualquier lectura de los porcentajes: no son tres promedios territoriales calculados de la misma manera.

Figura 18 Horas potenciales según el umbral de temperatura exterior

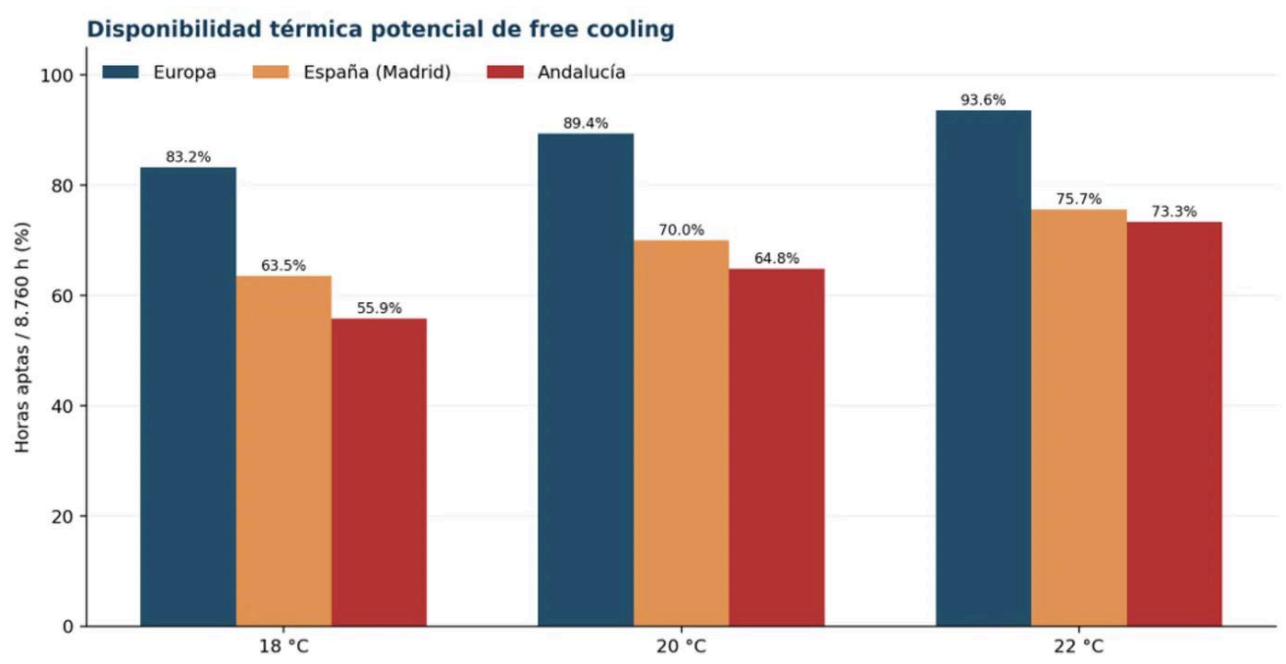


Tabla 13 Disponibilidad térmica y pérdida respecto al referente europeo

Umbral	Europa	España	Pérdida España	Andalucía	Pérdida Andalucía
18 °C	7.290 h · 83,2 %	5.565 h · 63,5 %	23,7 %	4.894 h · 55,9 %	32,9 %
20 °C	7.830 h · 89,4 %	6.130 h · 70,0 %	21,7 %	5.680 h · 64,8 %	27,5 %
22 °C	8.197 h · 93,6 %	6.627 h · 75,7 %	19,2 %	6.423 h · 73,3 %	21,6 %

Con el umbral de 20 °C, el referente europeo dispone de 7.830 horas; Madrid, de 6.130; y la media de las capitales andaluzas, de 5.680. La reducción respecto al referente europeo es del 21,7 % y del 27,5 %, respectivamente. Se calcula restando las horas del ámbito a las del referente y dividiendo por estas últimas.

Estos porcentajes expresan una pérdida relativa de disponibilidad horaria. No son puntos porcentuales de disponibilidad anual ni porcentajes de energía adicional. Para obtener el efecto energético habría que conocer qué carga térmica coincide con cada hora y cuánto consume el sistema en sus modos de operación.

Tabla 14 Dispersión de horas bajo 18 °C entre capitales andaluzas

Capital	Horas ≤ 18 °C	Disponibilidad anual	Pérdida frente a Europa
Cádiz	4.088	46,7 %	43,9 %
Huelva	4.113	47,0 %	43,6 %
Córdoba	4.566	52,1 %	37,4 %
Sevilla	4.615	52,7 %	36,7 %
Almería	4.704	53,7 %	35,5 %
Málaga	4.741	54,1 %	35,0 %
Jaén	5.855	66,8 %	19,7 %
Granada	6.470	73,9 %	11,3 %

La tabla provincial, calculada para el umbral de 18 °C, muestra 4.088 horas en Cádiz y 6.470 en Granada: una diferencia de 2.382 horas. El contraste pertenece a ese umbral, no al ejemplo anterior de 20 °C. Tampoco permite concluir que Granada siempre tendrá mejor PUE; todavía faltan la instalación, la carga y los demás condicionantes.

Elevar la temperatura de trabajo puede ampliar la economización si los equipos IT y el sistema de distribución lo admiten. La refrigeración líquida puede facilitar esa estrategia en determinadas arquitecturas, pero sigue necesitando un sistema de rechazo de calor. El ahorro depende del conjunto, incluidos los consumos de bombeo y la parte de carga que continúe refrigerándose por aire.

La humedad cambia la tecnología conveniente

La humedad relativa aislada explica poco. Su valor cambia cuando varía la temperatura del aire, aunque la cantidad de vapor permanezca constante. Para evaluar una estrategia de refrigeración conviene trabajar con datos horarios y distinguir punto de rocío, razón de humedad y temperatura de bulbo húmedo.

El punto de rocío ayuda a valorar el contenido de vapor y el riesgo de condensación. La razón de humedad permite realizar balances de vapor. La diferencia entre temperatura seca y bulbo húmedo indica el margen termodinámico disponible para enfriar mediante evaporación. Cada variable responde a una pregunta diferente.

Tabla 15 Variables higrométricas y utilidad para el diseño

Variable	Uso técnico	Limitación
Punto de rocío	Cuantifica el contenido de vapor y permite detectar aire demasiado húmedo o seco.	No expresa por sí solo la capacidad de refrigeración sensible.
Razón de humedad	Balance de masa de vapor, humidificación y deshumidificación.	Requiere presión barométrica y condiciones de mezcla para un cálculo detallado.
Depresión de bulbo húmedo	Potencial termodinámico de enfriamiento evaporativo.	El equipo real no alcanza el bulbo húmedo; depende de eficacia, agua y control.
Humedad relativa	Comprobación de límites en la entrada IT.	No debe usarse aislada como indicador climático.

En el free-cooling directo, el aire exterior puede requerir mezcla, humidificación o deshumidificación antes de llegar a los equipos IT. En un sistema indirecto no entra directamente en la sala, de modo que no corresponde aplicar sin más el mismo filtro higrométrico. La selección también debe considerar partículas, contaminantes, corrosión y control de transitorios.

Qué representa el cribado higrométrico

El análisis adopta una ventana de punto de rocío entre -9 y 15 °C y estudia una sensibilidad entre -12 y 17 °C. Son condiciones de cribado del modelo. Los rótulos recomendado y permisible de la tabla no sustituyen la comprobación de los límites ambientales del equipamiento y de la norma o especificación que corresponda a cada proyecto.

Tabla 16 Hipótesis del análisis térmico higrométrico y evaporativo

Elemento	Definición adoptada
Filtro térmico	Horas con temperatura exterior $\leq 18, 20$ o 22 °C.
Cribado higrométrico recomendado	Punto de rocío exterior entre -9 y 15 °C.
Sensibilidad permisible	Punto de rocío exterior entre -12 y 17 °C.
Evaporación idealizada	Eficacia de saturación del 80 %; hora recuperable si $T_{\text{salida}} \leq \text{umbral}$.
Europa	21 ubicaciones ponderadas por potencia IT declarada por Estado en el informe europeo de 2025.
España	Madrid como proxy del principal mercado; no es una media territorial nacional.
Andalucía	Media simple de las ocho capitales; no ponderada por potencia IT.

El cálculo de referencia utiliza la formulación de Magnus para el punto de rocío y una aproximación de Stull para el bulbo húmedo. Para una selección de equipos deben comprobarse el dominio de

validez de las aproximaciones y la presión atmosférica local; las estimaciones sirven aquí para comparar condiciones, no para certificar capacidad.

Figura 19 Penalización higrométrica adicional sobre las horas térmicamente aptas

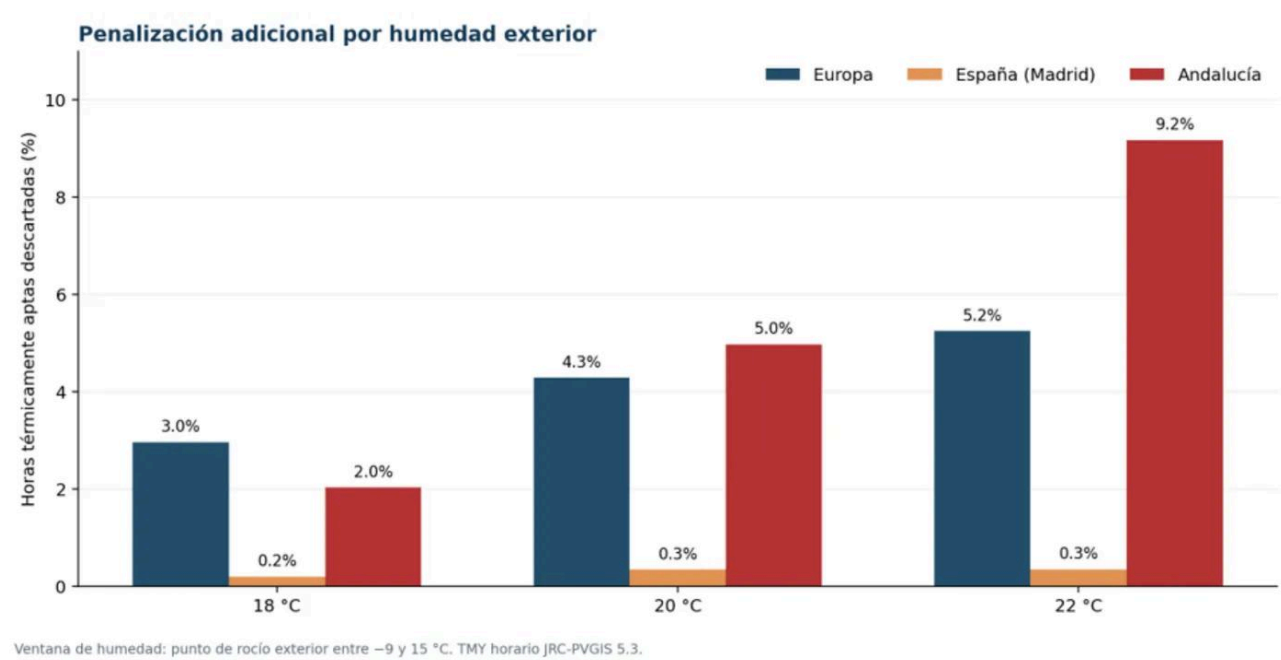


Tabla 17 Porcentaje de horas descartadas por el cribado higrométrico

Umbral	Europa	España (Madrid)	Andalucía
18 °C	3,0 %	0,2 %	2,0 %
20 °C	4,3 %	0,3 %	5,0 %
22 °C	5,2 %	0,3 %	9,2 %

Para 20 °C, el cribado descarta aproximadamente el 4,3 % de las horas térmicamente aptas del referente europeo, el 0,3 % de Madrid y el 5,0 % de la media andaluza. La base del porcentaje son las horas que ya superaron el filtro térmico. No debe sumarse directamente a la pérdida porcentual respecto al referente europeo, porque los denominadores son diferentes.

El análisis expresa ese descarte como unas 336 horas ponderadas en Europa, 21 en Madrid y 283 en Andalucía. En la media andaluza, el desglose comunicado atribuye aproximadamente 264 horas al exceso de humedad y 18 a aire demasiado seco; la pequeña diferencia respecto al total es compatible con el redondeo de las medias. El resultado no autoriza a afirmar que el aire seco nunca limita la economización directa.

Tabla 18 Síntesis de los resultados del análisis de humedad

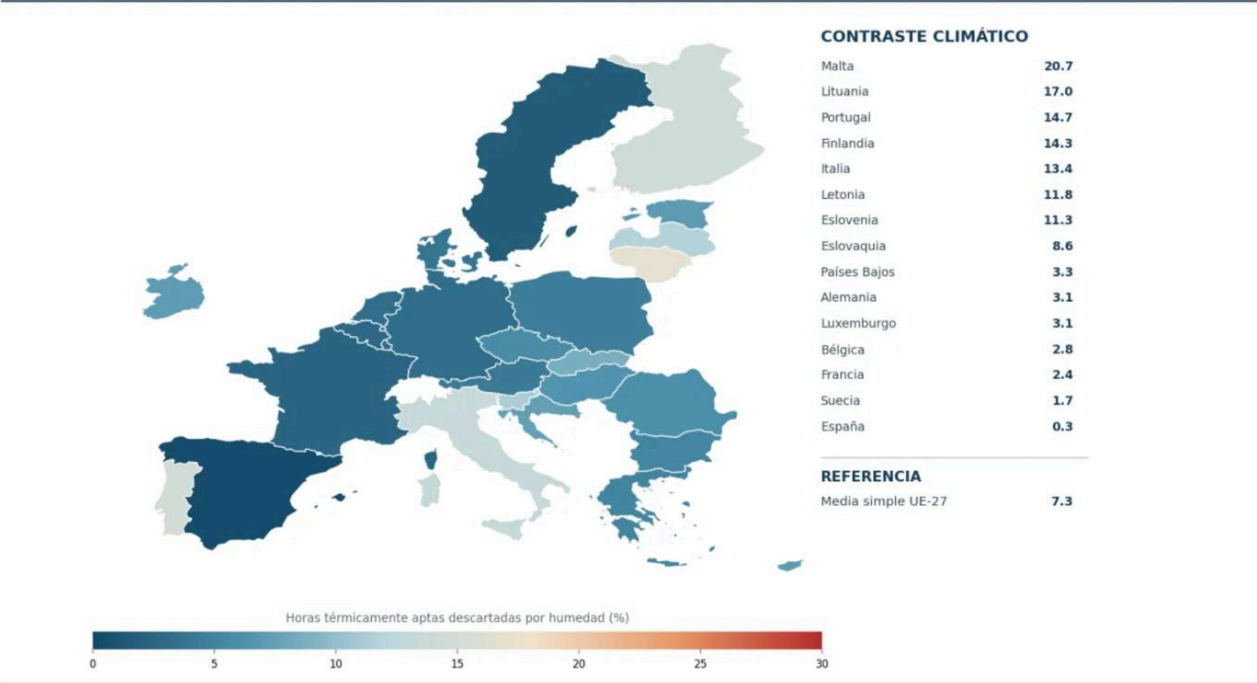
Magnitud	Resultado principal
España (Madrid)	La humedad descarta un 0,3 % de las horas térmicamente aptas a 20 °C; el límite dominante es la temperatura.
Andalucía	La humedad descarta un 5,0 % como media simple de ocho capitales; el efecto se concentra en el litoral.
Referente europeo	La penalización ponderada es 4,3 % con la misma condición psicrométrica.
Contraste provincial	Cádiz: 11,0 %; Huelva: 10,3 %; Jaén: 0,7 %.
Potencial evaporativo	Mayor en el interior seco; menor en Almería y litoral mediterráneo.
Conclusión regulatoria	La humedad cambia la tecnología óptima, pero no justifica por sí sola un factor nacional uniforme de PUE o WUE.

Los mapas siguientes muestran medias simples de sus ubicaciones: 7,3 % en el europeo y 8,4 % en el español. Esas agregaciones difieren del referente europeo ponderado de 4,3 % y del valor de Madrid de 0,3 % utilizados en la comparación anterior.

Figura 20 Comparación higrométrica de las referencias europeas

SEVERIDAD HIGROMÉTRICA PARA FREE COOLING EN LA UNIÓN EUROPEA

Porcentaje de horas térmicamente aptas descartadas por punto de rocío exterior · TMY horario



Método: horas con T exterior ≤ 20 °C; se descartan las que presentan punto de rocío exterior fuera de -9/15 °C.
Datos: JRC-PVGIS 5.3, TMY ERA5, selección 2005-2023. Criterio higrométrico: ASHRAE TC 9.9 (entrada IT). Cartografía: Eurostat GISCO, NUTS 2024.

Figura 21 Comparación higrométrica de las referencias españolas

SEVERIDAD HIGROMÉTRICA PARA FREE COOLING EN ESPAÑA

Indicador horario por punto de rocío exterior · ubicación representativa de cada comunidad

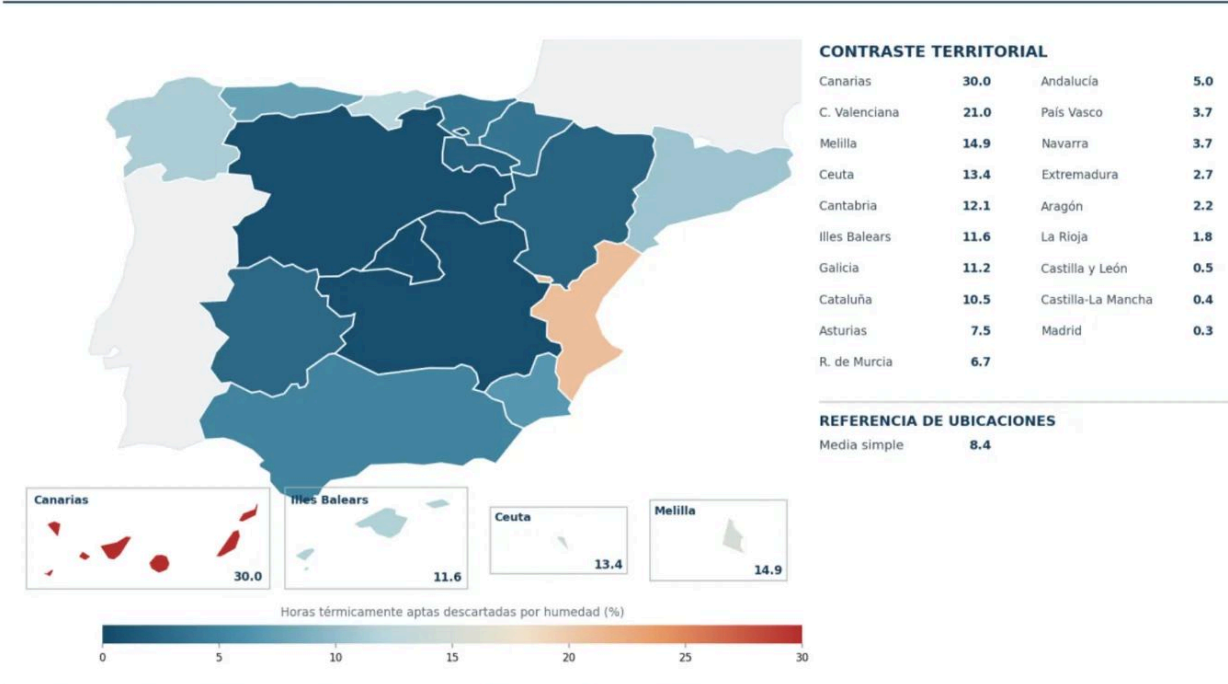
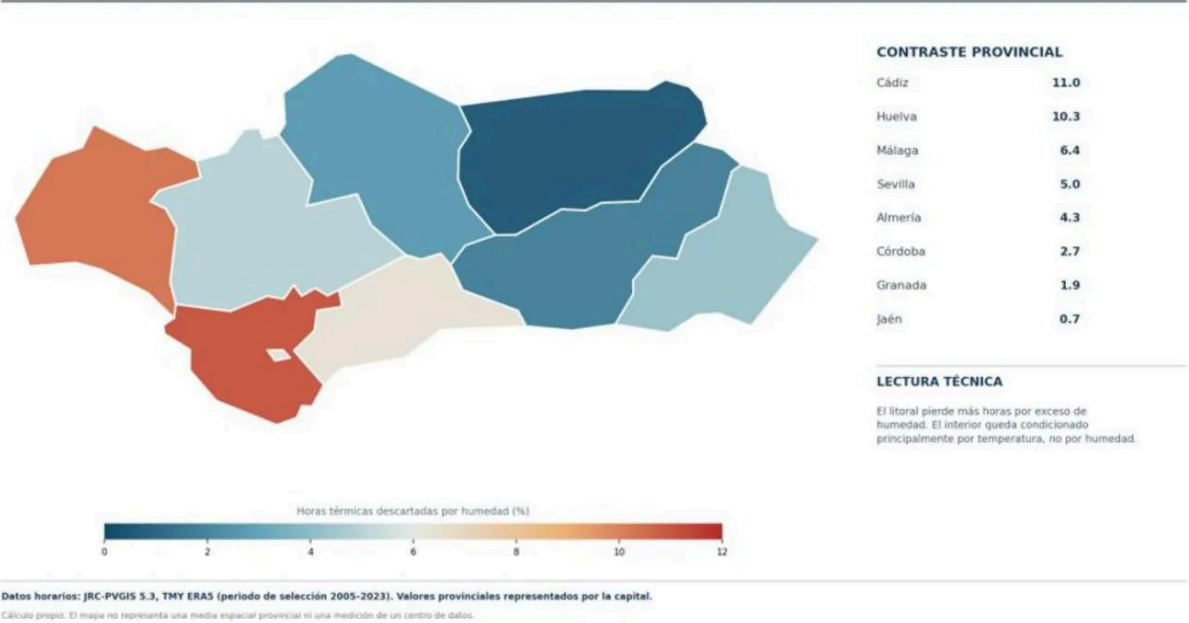


Figura 22 Comparación higrométrica de las capitales andaluzas

SEVERIDAD HIGROMÉTRICA PARA FREE COOLING EN ANDALUCÍA

Porcentaje de horas con T exterior ≤ 20 °C descartadas por punto de rocío fuera de -9/15 °C



La humedad afecta de forma distinta al interior y al litoral. Un ambiente cálido y seco puede ofrecer mayor margen evaporativo, mientras un bulbo húmedo elevado reduce el descenso de temperatura alcanzable. Sin embargo, no cabe asignar un único coeficiente de humedad a España o Andalucía: los resultados dependen de la ubicación y del sistema que se evalúe.

Energía y agua deben resolverse en el mismo balance

La evaporación permite acercar la temperatura del aire a su bulbo húmedo y puede reducir el esfuerzo del sistema frigorífico. Esa ventaja tiene un coste hídrico. El rechazo seco evita ese consumo evaporativo, pero puede exigir mayor superficie de intercambio, más caudal de aire o mayor trabajo de compresión durante las horas cálidas. El resultado anual depende de la combinación elegida y de su control.

El modelo evaporativo del análisis supone una eficacia de saturación del 80 %. Es una hipótesis para explorar posibilidades, no una garantía de equipo. Una hora recuperable por temperatura tampoco garantiza que el sistema cumpla simultáneamente los requisitos de humedad, calidad del aire y agua disponible.

Tabla 19 Condiciones climáticas y consecuencias para la selección tecnológica

Condición climática	Presión sobre PUE	Presión sobre WUE	Respuesta de diseño
Interior cálido y seco	Menos free cooling por temperatura; alto potencial evaporativo.	El uso evaporativo facilita PUE, pero dificulta WUE.	Rechazo seco eficiente, temperaturas elevadas de agua, refrigeración líquida y control por coste agua-energía.
Litoral cálido y húmedo	Menos horas de economización directa y menor margen evaporativo.	Puede requerir más agua para el mismo efecto o recurrir a sistema seco.	Indirecto/hidráulico, selección por bulbo húmedo, mezcla y control de punto de rocío.
Europa fría	Más horas térmicas; puede existir descarte por aire frío/seco.	Menor necesidad anual de evaporación.	Economización amplia, pero con control higrométrico y de contaminación.

La tabla resume tendencias de diseño. La expresión más agua para el mismo efecto no constituye una relación universal con la humedad: el consumo real depende del proceso, la carga, las purgas, la calidad del agua y el control. Debe calcularse mediante un balance específico.

El WUE mide una intensidad de uso de agua, pero no describe por sí solo la presión sobre el recurso local. Dos instalaciones con el mismo WUE pueden utilizar fuentes de distinta disponibilidad y calidad. La evaluación ambiental debe acompañar el indicador con el origen del agua, las restricciones estacionales y el balance de aportes, evaporación, purgas y otros usos incluidos en el perímetro.

Tampoco conviene confundir entrada de agua con volumen recirculado. Un circuito puede mover un gran caudal interno y requerir poca reposición; un sistema evaporativo necesita aportes para compensar pérdidas y controlar la concentración de sales. Seleccionar únicamente por el consumo nominal de un equipo dejaría fuera parte del balance anual del centro.

Cómo evaluar un proyecto con criterio ingenieril

El paso decisivo consiste en convertir la comparación climática en un modelo de instalación. Para cada hora deben conocerse la carga IT, la demanda térmica, las condiciones exteriores y el modo de funcionamiento. Las curvas de capacidad y consumo, los límites de operación y las consignas permiten calcular la energía de compresores, ventiladores y bombas. El resto de consumos del centro completa el numerador del PUE.

El balance hídrico debe seguir el mismo periodo y perímetro. Después conviene contrastar el resultado con escenarios de ocupación, mantenimiento, indisponibilidad de equipos y restricciones de agua. Un único punto de catálogo no representa esta secuencia de condiciones, y una predicción anual sin desglose dificulta comprobar dónde se origina el margen o el incumplimiento.

La simulación de un año típico necesita una comprobación adicional de capacidad en condiciones extremas. Además, un centro que operará durante décadas debe estudiar la sensibilidad a escenarios climáticos futuros. No se trata de asignar ahora un sobreconsumo sin datos, sino de comprobar cuánto margen pierde el diseño si aumentan las horas cálidas o las temperaturas de rechazo.

Medir el impacto y comparar el diseño

Como propuesta metodológica, resulta útil acompañar los PUE y WUE medidos con una evaluación normalizada bajo condiciones declaradas de clima y carga. Los primeros describen el uso real de recursos. La segunda podría ayudar a separar el efecto del emplazamiento del comportamiento del diseño, siempre que exista un procedimiento transparente y validado.

Esa normalización requiere definir clima de referencia, carga, límites, tecnologías y tratamiento de incertidumbres. Los mapas y porcentajes de este artículo no bastan para construirla. Una media móvil de varios años también puede aportar contexto meteorológico, pero debe mostrarse junto a los resultados anuales para no ocultar una degradación progresiva.

Figura 23 Propuesta gráfica de evaluación de PUE y WUE con contexto climático



Las diferencias climáticas justifican exigir una demostración técnica cuidadosa. No prueban por sí solas que un límite común resulte injustificado: esa decisión también depende de los objetivos ambientales, la viabilidad de las alternativas y sus costes. La ingeniería debe precisar esas diferencias antes de convertirlas en una conclusión regulatoria.

Qué permite concluir el análisis

Los objetivos PUE 1,15 y WUE 0,10 dejan un margen reducido para los consumos auxiliares y el aporte de agua. Su cumplimiento exige coordinar infraestructura eléctrica, refrigeración y operación. El clima condiciona la solución, pero no explica por sí solo el resultado.

La comparación horaria identifica menos oportunidades térmicas de economización en Madrid y en la media de las capitales andaluzas que en el referente europeo construido. El análisis de humedad añade diferencias locales y tecnológicas. Los episodios persistentes completan la lectura al mostrar condiciones que requieren comprobar capacidad y continuidad del servicio.

La conclusión defendible es una dificultad comparativa, no una imposibilidad universal. Un proyecto en un emplazamiento cálido debe demostrar cómo mantiene simultáneamente eficiencia, uso contenido de agua y capacidad suficiente. Esa demostración necesita balances horarios y equipos definidos. Un promedio territorial, por expresivo que resulte en un mapa, no puede sustituirla.

Referencias y alcance de los datos

[1] MITECO. Proyecto de real decreto sobre requisitos de sostenibilidad energética, medioambiental y de resiliencia y soberanía digital de los centros de datos. Audiencia pública de agosto-septiembre de 2026. El contexto normativo del artículo se refiere a esa versión.

<https://www.miteco.gob.es/es/energia/participacion/2026/detalle-participacion-publica-k-851.html>

[2] Comisión Europea. Reglamento Delegado (UE) 2024/1364, de 14 de marzo de 2024. Anexos II y III sobre información e indicadores de los centros de datos.

<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2024-80715>

[3] Comisión Europea, DG ENER; EY, AIT y Borderstep. Assessment of the Energy Performance and Sustainability of Data Centres in EU — First Technical Report, 2025. Referencia de las comparaciones de PUE y WUE. Los distintos indicadores pueden utilizar muestras y filtros diferentes.

<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/83be4c3e-5c79-11f0-a9d0-01aa75ed71a1/>

[4] Eurostat. Energy statistics — cooling and heating degree days. Metadatos del conjunto nrg_chdd y definición de CDD. Los cocientes climáticos no equivalen a cocientes de consumo energético.

https://ec.europa.eu/eurostat/cache/metadata/EN/nrg_chdd_esms.htm

[5] AEMET. Olas de calor en España desde 1975. Referencia para distinguir la definición meteorológica oficial del indicador de episodios persistentes adoptado en el análisis.

https://www.aemet.es/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/estudios/detalle/olascalor

[6] NASA POWER. Daily API y documentación metodológica. Fuente declarada para las series diarias 1991–2020 empleadas en la comparación de episodios.

<https://power.larc.nasa.gov/docs/services/api/temporal/daily/>

<https://power.larc.nasa.gov/docs/methodology/data/processing/>

[7] Comisión Europea, JRC. PVGIS. Fuente declarada para los años meteorológicos típicos de la comparación horaria: versión 5.3, ERA5, selección dentro de 2005–2023.

https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/

[8] Eurostat GISCO. Geometrías NUTS 2024. Referencia cartográfica administrativa.

<https://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/statistical-units/territorial-units-statistics>

Referencias complementarias del análisis climático: AEMET, Informe sobre el estado del clima de España 2023; Agencia Europea de Medio Ambiente, Europe's changing climate hazards; EEA y Climate-ADAPT, Heat and health. Los datos de episodios, disponibilidad horaria y humedad corresponden a cálculos derivados de las fuentes climáticas, no a resultados del informe europeo de PUE y WUE.

Las comparaciones utilizan periodos y agregaciones diferentes: 1991–2020 para episodios persistentes y años típicos seleccionados de 2005–2023 para el cribado horario. Su función es explorar mecanismos y contrastes. La validación de un emplazamiento requiere conservar

coordenadas, series, ponderaciones, fórmulas y reglas de control, y contrastar las hipótesis con el proyecto real.