



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

CÁLCULO DE LA EXPOSICIÓN A LA LLUVIA BATIENTE EN
FACHADAS DEL ESTE DE ESPAÑA APLICANDO EL ESTÁNDAR
ISO 15927-3

CALCULATION OF WIND-DRIVEN RAIN EXPOSURE ON
BUILDING FAÇADES IN EASTERN SPAIN USING ISO 15927-3
STANDARD

Autor:

Teresa Sebastián Millán

Director:

José María Pérez Bella

Titulación:

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

2024

RESUMEN

La filtración de las precipitaciones atmosféricas en las fachadas puede causar graves problemas a la durabilidad de los edificios, a su eficiencia energética y a las personas que los ocupan. La principal fuente de humedad para la penetración de agua atmosférica en las fachadas de los edificios proviene de la combinación simultánea de lluvia y viento, lo que genera un aporte de agua sobre el cerramiento (lluvia batiente o wind-driven rain). Así, la magnitud de lluvia batiente recibida por la fachada depende de los valores de intensidad de precipitación y velocidad de viento registrados de forma simultánea en el ámbito de la fachada.

Este TFG pretende analizar la exposición de las fachadas de los edificios de varias regiones españolas (Aragón, Navarra, Castilla-La Mancha e Islas Baleares) a la lluvia batiente, de acuerdo al método establecido por el estándar ISO 15927-3. Para ello se analizarán datos climáticos 30-minutales (precipitación, dirección- velocidad del viento) de múltiples estaciones, facilitados por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y correspondientes al intervalo entre 01/01/2013 hasta 31/12/2022 (10 años). Usando la formulación presente en la norma ISO 15927-3, se determina la exposición media anual de dichos emplazamientos a la lluvia batiente en fachadas, así como su exposición máxima asociada a periodos de humedecimiento concretos. Utilizando una herramienta BIM, se elaboran mapas de exposición relativos a las regiones analizadas.

Los resultados se comparan con el grado de impermeabilidad exigido actualmente por el Código Técnico de la Edificación, Documento Básico HS1 Salubridad para esas mismas zonas. La definición de este grado de impermeabilidad se basa en el análisis de la pluviometría media anual y la velocidad básica del viento o velocidad máxima que podrá registrarse durante 10 minutos en los próximos 50 años. De este modo se validará la fiabilidad real de las caracterizaciones que se han venido dando por válidas hasta el momento en nuestro país.

Complementariamente, se ha analizado la intensidad máxima de precipitación asociada a diferentes intervalos de registro, con el objetivo de establecer regresiones efectivas que permitan extrapolar valores de intensidad asociados a intervalos de registro diferentes (curvas intensidad-duración). El mismo análisis ha sido realizado para los registros de velocidad de viento asociados a distintos intervalos de registro, así como exclusivamente para los registros de viento simultáneos a eventos de precipitación. Para

todos ellos, se determinan también los valores de intensidad y velocidad vinculados a diferentes períodos de ocurrencia (períodos de retorno).

ÍNDICE

RESUMEN.....	2
ÍNDICE	4
INTRODUCCIÓN.....	6
OBJETIVOS	12
ALCANCE	13
METODOLOGÍA.....	20
RESULTADOS.....	27
DISCUSIÓN	37
CONCLUSIÓN	41
BIBLIOGRAFÍA	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ejemplo de eflorescencias y desprendimiento de revestimientos en fachadas por efecto del agua atmosférica	6
Figura 2: Zonas pluviométricas establecidas en el CTE DB-HS1 para el diseño de fachadas	7
Figura 3: Zonas eólicas.....	8
Figura 4: Fundamentos de la lluvia batiente	9
Figura 5: Mapa climático de las Islas Baleares.....	14
Figura 6: Distribución geográfica de las estaciones analizadas en las Islas Baleares.....	14
Figura 7: Mapa climático de la Comunidad Foral de Navarra	16
Figura 8: Distribución geográfica de las estaciones de Navarra	16
Figura 9: Mapa climático de Aragón	17
Figura 10: Distribución geográfica de las estaciones de Aragón	17
Figura 11: Mapa climático de Castilla La-Mancha.....	18
Figura 12: Distribución geográfica de las estaciones de Castilla La Mancha	18
Figura 13: Mapa climático de España.....	19
Figura 14: Distribución geográfica de todas las estaciones seleccionadas	19
Figura 15: Definición del periodo de humedecimiento	22
Figura 16: Ficha técnica 1 de datos relevantes de cada estación.....	28
Figura 17: Curva IDF recogida en el Plan General de Ordenación Urbana de Zaragoza, Anejo 6, Infraestructuras:	29
Figura 18: Ficha técnica 2 de datos relevantes de cada estación.....	30
Figura 19: Ficha técnica 3 de datos relevantes de cada estación.....	31
Figura 20: Variables estudiadas y sus unidades	32
Figura 21: Mapa de exposición asociado a la	33
Figura 22: Mapa de exposición asociado a ls	35

Figura 23: Grados de impermeabilidad en Castilla La-Mancha.....	38
Figura 24: Grados de impermeabilidad en las Islas Baleares	38
Figura 25: Grados de impermeabilidad en Aragón.....	39
Figura 26: Grados de impermeabilidad en Navarra	39
Figura 27: Grados de impermeabilidad en el este de España.....	40

ÍNDICE DE FÓRMULAS

Fórmula 1: Lluvia batiente media anual	20
Fórmula 2: Lluvia batiente por periodo de humedecimiento	22
Fórmula 3: Periodo de retorno	23
Fórmula 4: Dirección horaria a partir de registros 30-minutales	24

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Grado de exposición al viento	8
Tabla 2: Grado de impermeabilidad mínimo	8
Tabla 3: Condiciones de las soluciones de la fachada	9

ANEXOS

ANEXO I: HOJAS RESUMEN

ANEXO II: MAPAS DE EXPOSICIÓN

ANEXO III: HOJAS TÉCNICAS

ANEXO IV: DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL

INTRODUCCIÓN

El humedecimiento en edificios es un problema que se debe solucionar de forma efectiva, y que puede producirse de distintas formas: por infiltración, condensación y capilaridad. Todos estos tipos de humedades pueden provocar daños no solamente estructurales y estéticos en edificios (disminuyendo su durabilidad y aumentando sustancialmente los gastos de mantenimiento), también aumenta el gasto energético de la vivienda y provoca graves problemas de salubridad a los habitantes de estas (enfermedades respiratorias, asma, alergias...)[1-7].



Figura 1: Ejemplo de eflorescencias y desprendimiento de revestimientos en fachadas por efecto del agua atmosférica

Una de las principales causas de presencia de humedad en estado líquido en los cerramientos de la edificación es su deficiente impermeabilización, donde el agua de lluvia llega a adentrarse por resquicios y defectos de construcción, fisuras y poros de gran tamaño, avanzando a través del material y provocando acumulación en puntos concretos. Este contenido excesivo de humedad en el interior del material, o su paso directo a través de las hojas del cerramiento, puede provocar zonas húmedas, mohos o incluso valores con una humedad relativa excesiva en el interior de las estancias [1-7].

En España, la necesidad de un control más exhaustivo de la presencia indebida de agua atmosférica o humedad en los edificios llevó a la introducción de un requisito básico específico en el Código Técnico de la Edificación (CTE): el Documento Básico HS1

Salubridad (CTE DB- HS1). Este documento tiene por objeto establecer los requisitos de diseño que permiten reducir el riesgo de penetración de agua a través de la envolvente del edificio [8].

En el CTE, se establecen condiciones de diseño relativas a elementos constructivos como muros, suelos, fachadas y cubiertas, incluyendo condiciones específicas relativas a la resolución de detalles constructivos relacionados con estos elementos. En el caso específico de la protección de las fachadas ante la humedad atmosférica, el grado de impermeabilidad mínimo de fachadas frente a la penetración de las precipitaciones se establece en función de la zona pluviométrica de promedios y de un grado de exposición al viento correspondiente a la ubicación del edificio y altura de la fachada [8].

La zona pluviométrica de promedios se determina mediante un mapa de exposición (pluviometría media anual del emplazamiento), categorizado en 5 intervalos (I-V). La división territorial dependiendo de la pluviometría anual se observa en el siguiente mapa [8].



Figura 2: Zonas pluviométricas establecidas en el CTE DB-HS1 para el diseño de fachadas

El grado de exposición al viento se obtiene gracias a una tabla que relaciona la altura del edificio con la clase del entorno del edificio (E1 para zonas urbanas, industriales y forestales y E0 para zonas llanas y despejadas), determinando el grado de exposición al viento (V1, V2 y V3). En la tabla se entra también considerando la velocidad básica del viento (A, B, C) en el emplazamiento, obtenida a partir de un mapa de exposición. Esta velocidad básica representa la máxima velocidad de viento que es previsible que pueda ocurrir, mantenida durante un intervalo de 10 minutos, en los próximos 50 años (periodo de retorno de 50 años). Es el mismo valor que se utiliza como base para determinar las cargas

estructurales que han de soportar los edificios y en ningún caso es un valor representativo de la velocidad de viento simultánea a la mayoría de los eventos de precipitación [8].

Tabla 1: Grado de exposición al viento

Altura del edificio en m	Clase del entorno del edificio					
	E1			E0		
	Zona eólica			Zona eólica		
A	B	C	A	B	C	
≤15	V3	V3	V3	V2	V2	V2
16 - 40	V3	V2	V2	V2	V2	V1
41 - 100 ⁽¹⁾	V2	V2	V2	V1	V1	V1

⁽¹⁾ Para edificios de más de 100 m de altura y para aquellos que están próximos a un desnivel muy pronunciado, el grado de exposición al viento debe ser estudiada según lo dispuesto en el DB-SE-AE.



Figura 3: Zonas eólicas

Al combinar ambos parámetros, se obtiene la siguiente tabla, en la cual se determina el grado de impermeabilidad requerido en cada situación. Cuanto mayor es el grado de impermeabilidad, las condiciones constructivas de diseño son más estrictas y exigentes [8].

Tabla 2: Grado de impermeabilidad mínimo

Grado de exposición al viento	Zona pluviométrica de promedios				
	I	II	III	IV	V
V1	5	5	4	3	2
V2	5	4	3	3	2
V3	5	4	3	2	1

Las condiciones exigidas a las soluciones constructivas vienen determinadas en función de la necesidad de revestimiento exterior o no y del grado de impermeabilidad. Algunas veces estas condiciones son únicas o hay distintas variaciones [8].

Tabla 3: Condiciones de las soluciones de la fachada

		Con revestimiento exterior		Sin revestimiento exterior			
Grado de impermeabilidad	≤1	R1+C1 ⁽¹⁾		C1 ⁽¹⁾ +J1+N1			
	≤2			B1+C1+J1+N1	C2+H1+J1+N1	C2+J2+N2	C1 ⁽¹⁾ +H1+J2+N2
	≤3	R1+B1+C1	R1+C2	B2+C1+J1+N1	B1+C2+H1+J1+N1	B1+C2+J2+N2	B1+C1+H1+J2+N2
	≤4	R1+B2+C1	R1+B1+C2	R2+C1 ⁽¹⁾	B2+C2+H1+J1+N1	B2+C2+J2+N2	B2+C1+H1+J2+N2
	≤5	R3+C1	B3+C1	R1+B2+C2	R2+B1+C1	B3+C1	
	(1) Cuando la fachada sea de una sola hoja, debe utilizarse C2.						

Esta manera de cuantificar la exposición de las fachadas ante la penetración de agua atmosférica choca, sin embargo, con el conocimiento internacional en la materia y presenta diversas incertidumbres que provocan que su fiabilidad sea mínima [8].

Así, en la bibliografía internacional se encuentra plenamente asumido que la principal fuente de agua sobre las fachadas de los edificios proviene de la combinación de precipitaciones atmosféricas y rachas de viento simultáneas, las cuales provocan que las gotas de lluvia se desvíen de su habitual trayectoria vertical y lleguen a impactar en las superficies verticales de las fachadas. A este fenómeno se le denomina lluvia batiente o Wind-Driven Rain (WDR) [9].

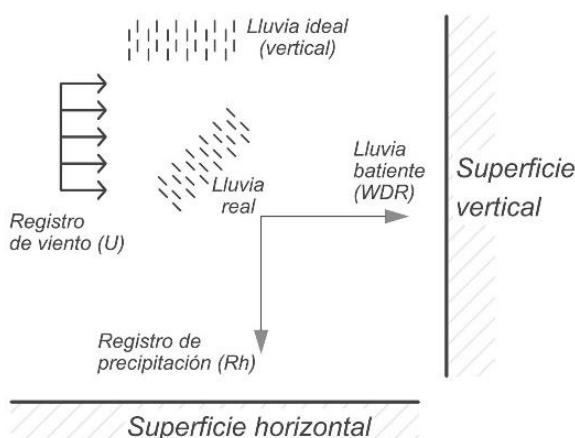


Figura 4: Fundamentos de la lluvia batiente

Como se puede deducir, la aproximación planteada por el Código Técnico de la Edificación no tiene en cuenta la necesaria simultaneidad entre los datos climáticos de entrada relativos a la precipitación y velocidad de viento, entre otros aspectos que hacen dudar de la bondad de la aproximación, tal y como ha sido ya enunciado por algunos investigadores [9-12]:

“1. Mientras el valor de pluviometría se asocia a una exposición anual, la velocidad básica del viento hace referencia al valor máximo que se puede presentar durante un intervalo de tan solo 10 minutos de duración. Consecuentemente, ambos parámetros no pueden ser combinados para caracterizar una solicitud rígurosa, referida a un intervalo de tiempo común.

2. Tampoco ambos parámetros son conceptualmente relacionables, ya que mientras la pluviometría se refiere a un valor medio, promedio anual de registros meteorológicos pasados, la velocidad básica del viento se asocia al valor máximo estimado para un periodo de retorno de 50 años, valor por lo tanto obtenido mediante previsiones estadísticas de eventos máximos.

3. El valor de pluviometría, por sí solo no permite caracterizar la cantidad de agua que incide sobre las fachadas, ya que no valora la acción del viento simultánea a dichas precipitaciones, responsable de la desviación de las gotas de lluvia sobre los cerramientos verticales. Por lo tanto, la precipitación registrada sobre una superficie horizontal, no puede ser considerada una medida representativa del grado de humedecimiento de las fachadas.

4. El valor de velocidad básica del viento, tampoco es representativo de la presión eólica que se produce simultáneamente a los eventos de precipitación (ya que para su cálculo se analizan indistintamente registros de vientos simultáneos o no a la precipitación), por lo que este parámetro no es válido para caracterizar la influencia de la presión eólica en el proceso de penetración de agua en las fachadas.

5. El procedimiento utilizado para determinar el grado de exposición al viento, basado en un mapa zonificado y una asignación tabulada (Figura 2), no permite asociar un valor numérico a dicho grado de exposición. La ausencia de una caracterización cuantitativa, conlleva una inherente indeterminación que impide comparar con exactitud la exposición al viento en diferentes emplazamientos o condiciones de servicio del cerramiento.” [9]

En la actualidad, el método de cálculo más extendido para determinar la exposición de las fachadas a la lluvia batiente está recogido en el estándar ISO 15927-3, aprobado en 2009 y traspuesto al marco normativo español a través de la norma UNE- EN ISO 15927-3 aprobada en 2011 [13].

Como se analizará en detalle en el apartado de metodología, este estándar se basa en el análisis de registros climáticos simultáneos de precipitación y velocidad-dirección de viento, relativos a intervalos de registros horarios, recopilados durante un periodo mínimo de 10 años en cada emplazamiento. A partir de estos datos, se determinará tanto la

exposición media anual de cada posible orientación de fachada a la lluvia batiente, como la exposición asociada a periodos de humedecimiento intensos, pero de corta duración, como los que por ejemplo son característicos de CC.AA. del sureste de España [9, 13].

En España, debido a la tardía implantación extensiva de estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) a lo largo de la primera década del siglo XXI, la disponibilidad de datos horarios en múltiples emplazamientos está restringida a una antigüedad máxima de 10-15 años. Aun así, se han realizado numerosos estudios intentando mitigar esa falta de exactitud [9]. Este estudio trata de ampliar el alcance de la caracterización de este fenómeno realizado hasta ahora en España, siguiendo para ello estrictamente el método establecido por el estándar ISO 15927-3, en base a las series de datos climáticos horarios que empiezan a estar disponibles, de forma gratuita, para muchos emplazamientos y con la antigüedad requerida para el análisis [14, 13].

OBJETIVOS

El trabajo realizado pretende analizar la exposición de la lluvia batiente en fachadas de emplazamientos situados en el este de España, concretamente en las Comunidades Autónomas de Navarra, Castilla-La Mancha, Aragón e Islas Baleares, aplicando para ello el procedimiento de cálculo establecido por el estándar ISO 15927-3.

Para alcanzar este objetivo se analizarán datos climáticos 30-minutales de precipitación, dirección y velocidad del viento, registrados en múltiples estaciones agrometeorológicas de estas regiones, relativos a un periodo de 10 años (01/01/2013 hasta el 31/12/2022). Estos registros meteorológicos pueden obtenerse de forma gratuita mediante su descarga de un servidor del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación del Gobierno de España.

El análisis realizado en base al estándar ISO 15927-3 permitirá determinar la exposición media anual de las fachadas a la lluvia batiente, en cada emplazamiento y para diferentes orientaciones de la fachada. A su vez, se caracterizará la exposición de estas mismas fachadas ante precipitaciones intensas de duración limitada (periodos de humedecimiento). Todos estos resultados se representarán mediante mapas de exposición (isolíneas), detallados para cada una de las Comunidades Autónomas estudiadas.

Los resultados obtenidos serán comparados con el grado de impermeabilidad requerido en el Código Técnico de Edificación, Documento Básico HS1 Salubridad (CTE DB-HS1), para fachadas situadas en estos mismos emplazamientos.

El análisis de todos los datos climáticos de las estaciones permitirá identificar, además, valores máximos de precipitación, velocidad de viento y velocidad de viento simultánea a la precipitación vinculados a distintos periodos de retorno. Aplicando la distribución de Gumbel (Teoría de Valores Extremos), se logrará estimar la probabilidad de ocurrencia de cualquier magnitud de estas variables a lo largo del tiempo.

ALCANCE

Las estaciones estudiadas en este trabajo se encuentran situadas en CC.AA. del este de España (Comunidad Foral de Navarra, Aragón, Castilla-La Mancha e Islas Baleares). En todas ellas se han analizado registros meteorológicos 30-minutales (posteriormente agrupados para obtener los registros horarios requeridos por el estándar ISO 15927-3), relativos a un periodo mínimo de 10 años (en este caso desde 2013 hasta 2022). Todos los datos han sido facilitados por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, a través de la aplicación MI SIAR, la cual permite guardar consultas, solicitar envíos periódicos de datos y consulta de datos masivos [14].

Los registros meteorológicos recopilados son de dos tipos distintos para poder modelizar los fenómenos considerados. Éstos son los siguientes:

- Registros de intensidad de precipitación, es decir, cantidad de agua acumulada en una superficie horizontal, por unidad de tiempo. Las unidades son mm o l/m².
- Velocidad y dirección de viento, expresado en m/s y en °, respectivamente.

Algunas estaciones meteorológicas inicialmente disponibles en el repositorio de datos climáticos han tenido, sin embargo, que ser desechadas por insuficiencia de datos, bien sea por falta de antigüedad en los mismos, bien por la existencia de largos periodos sin datos provocados por fallos electrónicos o periodos de mantenimiento de las estaciones. Por ello, la premisa principal que se ha seguido es la eliminación de estaciones que no contaran con datos de más de tres años. En aquellos casos en los que simplemente existían ausencias puntuales de datos, dichos valores se han considerado nulos, asignando celdas vacías en el programa Excel y calculando posteriormente el porcentaje de los datos válidos en la estación para analizar la representatividad.

Islas Baleares

El clima de las Islas Baleares se puede considerar de tipo mediterráneo. No obstante, dada a la diferencia de latitud entre islas y en la propia isla de Mallorca, se identifica una disminución de precipitaciones de norte a sur. Por ejemplo, en Mallorca la cifra mínima es de 500 mm/año, ascendiendo a 1000 mm/año en las zonas elevadas de la Sierra de Tramontana (que provoca la retención y estancamiento de los frentes de lluvia) [15].

Los episodios más notables de lluvia vienen asociados a las siguientes situaciones:

- Borrascas de procedencia atlántica que llegan a las Baleares con predominio de vientos de componente oeste.
 - Temporales de Levante con vientos del este o noreste.
 - Situaciones de “DANA” o “gota fría” en niveles altos, gravitando sobre aire muy cálido y húmedo, con gran inestabilidad.

Las borrascas invernales provocan abundantes y continuadas lluvias acompañadas de fuertes vientos, así como, a finales de verano y durante el otoño es muy probable que se den episodios de lluvias torrenciales [15].

En las Islas Baleares se han estudiado un total de 9 estaciones. En Mallorca se encuentran 8 de ellas, resultando una proporción de 452,475 km²/estación. La estación restante está en Menorca, proporcionando una cobertura de 701 km²/estación [16, 17].

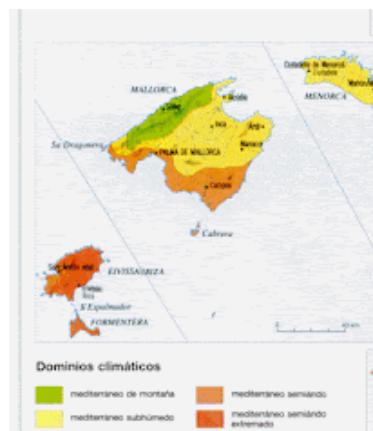


Figura 5: Mapa climático de las Islas Baleares

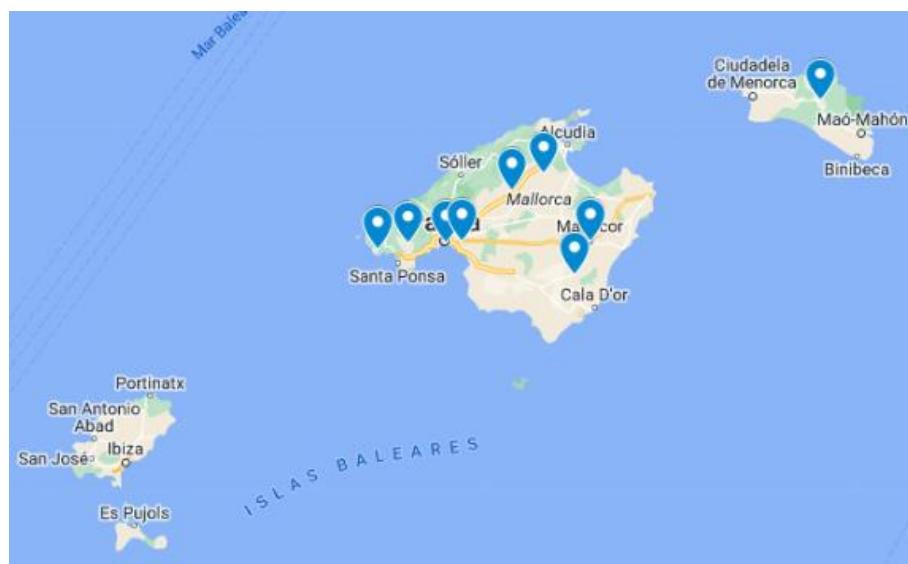


Figura 6: Distribución geográfica de las estaciones analizadas en las Islas Baleares

Comunidad Foral de Navarra

En la Comunidad Foral de Navarra se pueden distinguir cuatro tipos distintos de clima, divididos en zona Atlántica, zona Pirenaica, zona Media y zona Sur. En la zona Atlántica, el clima es oceánico o marítimo de costa occidental (Cfb) según Köppen, con abundantes lluvias, nieblas y lloviznas, siendo la zona más lluviosa de Navarra. Las montañas del norte de la provincia hacen que las masas de aire húmedas procedentes del Cantábrico, se vean obligadas a ascender y producir abundantes precipitaciones, llegando a una precipitación acumulada entre 900 mm/año al sur de la Sierra De Urbasa hasta 2500 mm/año en las zonas más templadas de los valles [18].

En la zona Pirenaica, el clima es oceánico o marítimo de costa occidental (Cfb) aunque con inviernos más fríos, y en las cimas más altas se puede considerar clima subalpino o continental de verano fresco (Dfb) según Köppen. En esta zona, de norte a sur disminuyen las precipitaciones, la cordillera pirenaica, dispuesta de este a oeste, supone una barrera a las nubes que vienen del norte, por ello, la pluviometría acumulada en el norte alcanza 2200 mm/año mientras que en el sur es de 1000 mm/año [18].

Zona Media, se pueden distinguir en la misma, tres climas muy marcados, en la zona norte, clima suboceánico o marítimo de costa occidental Cf2b, en la zona sur con un clima mediterráneo de veranos frescos CSb y en el extremo suroriental con un clima subtropical húmedo Cfa según Köppen. Las precipitaciones acumuladas de norte a sur oscilan entre 1000 a 600 mm/año [18].

En la Zona Sur el clima es mediterráneo Csa, de precipitaciones escasas con fuerte irregularidad intermensual e interanual, con largos periodos que no se registran lluvias. Se alcanzan los 600mm anuales en el límite con la Zona Media y van disminuyendo hacia el sur apareciendo el clima estepario frío o Bsk, con unas precipitaciones inferiores a 400 mm/año [18].

En la Comunidad Foral de Navarra el estudio se ha realizado sobre un total de 27 estaciones repartidas por toda la comunidad. La cobertura de estaciones resultante asciende a 384.8 km²/estación [16, 17].

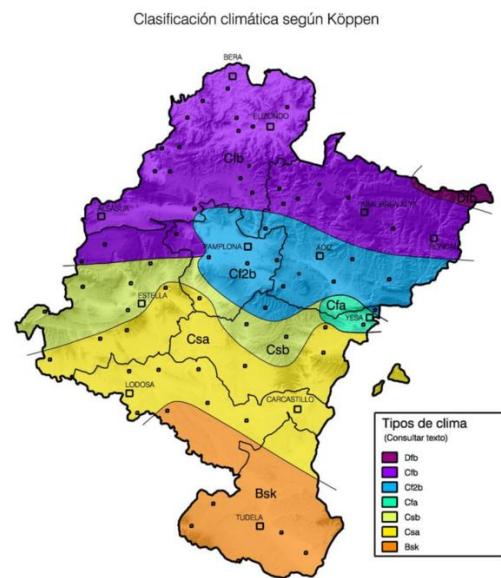


Figura 7: Mapa climático de la Comunidad Foral de Navarra

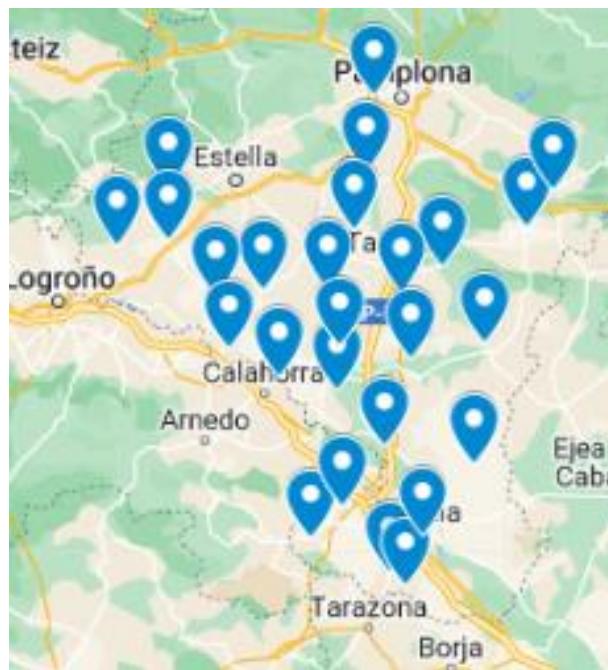


Figura 8: Distribución geográfica de las estaciones de Navarra

Aragón

En Aragón se pueden diferenciar tres tipos de clima distintos, todos se caracterizan por precipitaciones escasas e irregularidad interanual. En gran parte de la superficie la precipitación anual acumulada inferior a 500 mm/año, superando esta cifra hasta los 700 mm/año en los somontanos pirenaicos y ciertos puntos de la cordillera ibérica, y valores inferiores a 400 mm/año en el centro de la comunidad. Las tres zonas climáticas son clima mediterráneo continentalizado, clima de montaña y clima continental [19].

También hay que tener en cuenta los vientos tan característicos de Aragón, estos son el cierzo o viento de poniente y el bochorno o levante, que superar grandes velocidades [19].

En Aragón, las estaciones están repartidas en las tres provincias, 1 en Teruel, 21 en Huesca y 5 en Zaragoza, considerando 27 estaciones en total. En su conjunto la cobertura de estaciones asciende a $1767.4 \text{ km}^2/\text{estación}$. Teruel contiene la peor cobertura, con apenas 1 estación por cada 5700 km^2 , Huesca la mejor cobertura ($744.1 \text{ km}^2/\text{estación}$) y Zaragoza alcanza $3438 \text{ km}^2/\text{estación}$ [16, 17].

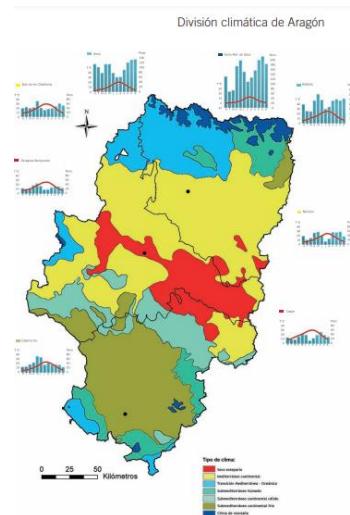


Figura 9: Mapa climático de Aragón

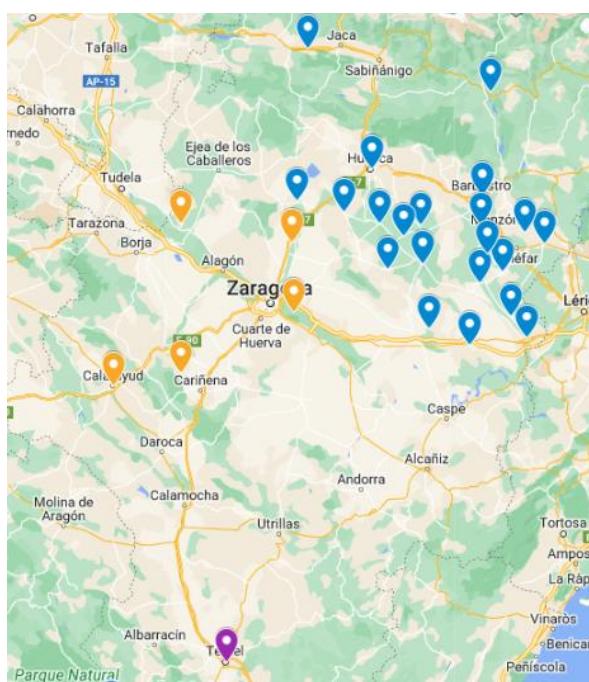


Figura 10: Distribución geográfica de las estaciones de Aragón

Castilla-La Mancha

En Castilla La Mancha, gracias a su gran extensión de terreno, se pueden diferenciar 2 tipos de clima distintos, templado de mediterráneo continentalizado y estepario. Debido a estos climas, las precipitaciones en toda la comunidad son escasas, variando entre los 350 y 500 mm/año, aunque cabe destacar, que, en las montañas, estas son más abundantes [20].

En Castilla la Mancha, se han estudiado un total de 40 estaciones, alcanzando una cobertura en la región de $767 \text{ km}^2/\text{estación}$. Por provincias, se alcanzan las siguientes coberturas: $2434 \text{ km}^2/\text{estación}$ en Guadalajara, $658.8 \text{ km}^2/\text{estación}$ en Toledo, en Albacete $637.7 \text{ km}^2/\text{estación}$, $2142.5 \text{ km}^2/\text{estación}$ en Cuenca y, finalmente, en Ciudad Real una cobertura de $2201.4 \text{ km}^2/\text{estación}$ [16, 17].



Figura 11: Mapa climático de Castilla La-Mancha



Figura 12: Distribución geográfica de las estaciones de Castilla La Mancha

La siguiente figura muestra el reparto de todas estaciones en el contexto general del Este de España. La Comunidad Autónoma de Cataluña ha sido descartada de este estudio por no estar recogidos sus datos en el repositorio de datos de SIAR y no haber podido acceder a los mismos de forma gratuita y funcional a través de otros organismos. Por su parte, la Comunidad Valenciana ha sido descartada del análisis, en coordinación con el director del TFG, debido al elevado número de estaciones adicionales a considerar, ya que su análisis habría excedido por mucho el alcance inicialmente previsto para el trabajo.

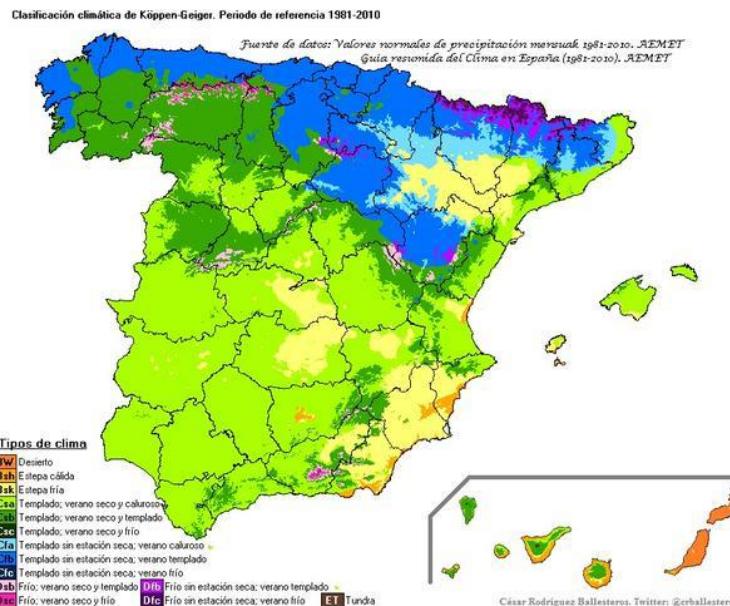


Figura 13: Mapa climático de España



Figura 14: Distribución geográfica de todas las estaciones seleccionadas

METODOLOGÍA

La lluvia batiente se define como la combinación de precipitación y velocidad de viento, cuyo efecto desvía la trayectoria de las gotas de agua de su trayectoria vertical hasta hacerlas impactar contra las fachadas (superficies verticales). Para caracterizar la cantidad de agua que llega a las fachadas el estándar ISO 15927-3 establece un procedimiento de cálculo semi-empírico a partir de datos horarios de la dirección y velocidad del viento y de la intensidad lluvia, heredero de un estándar británico previo [9, 13].

A continuación, se expone el cálculo establecido en el estándar de una forma detallada, explicando todos los pasos seguidos para obtener los resultados presentados en este proyecto.

Cálculo de la lluvia batiente media anual

Para todo lugar que se disponga de valores horarios de la velocidad y dirección del viento, así como de la intensidad de lluvia con una antigüedad de al menos $N \geq 10$ años, el índice anual de exposición a la lluvia batiente para una orientación cualquiera de la fachada viene dada por la siguiente fórmula [13]:

$$I_A = \frac{2 \sum v r^{8/9} \cos(D - \theta)}{N}$$

Fórmula 1: Lluvia batiente media anual

En la fórmula anterior, v representa la velocidad del viento media correspondiente al registro horario [m/s], a una altura de 10 metros sobre la rasante de un terreno despejado. D es la dirección del viento [°], r representa la intensidad de lluvia [l/m^2] y finalmente, θ representa las posibles orientaciones de las fachadas a analizar. Es por tanto necesario realizar un cálculo independiente y diferenciado para cada posible orientación de fachada, que en este estudio se ha discretizado en 24 intervalos de 15° cada uno. Finalmente, el coeficiente de ajuste empírico fijado por la normativa es igual a 2/9.

El sumatorio únicamente considera aquellas horas en las que el término coseno es positivo, es decir, aquellas horas en las que el viento sopla contra la fachada analizada, permitiendo la deposición en ella de las gotas de lluvia.

La utilización de registros horarios permite minimizar el error cometido por la falta de simultaneidad entre los datos de viento y precipitación: Se ha demostrado como la utilización de datos mensuales y anuales (muy utilizados en décadas pasadas) provocan significativos errores, mientras que los datos diezminutales o minutales, están disponibles en un número insuficiente de emplazamientos. El uso de datos horarios proporciona un buen compromiso entre precisión y disponibilidad, por lo que hizo que fueran establecidos para su uso en el estándar internacional [9].

Del análisis de la fórmula se desprende que una elevada exposición a la lluvia batiente puede producirse tanto por precipitaciones moderadas acompañadas de intensos vientos, como por precipitaciones intensas acompañadas por velocidades de viento moderadas. Ambos factores son importantes y la caracterización de su simultaneidad, esencial para la precisión del resultado obtenido.

Del mismo modo, la existencia de vientos predominantes durante los eventos de precipitación (asociados al ciclo de rotación de borrascas habitualmente), provocará que existan orientaciones de fachadas siempre más expuestas a la lluvia batiente que otras.

Cálculo de la exposición a la lluvia batiente durante períodos de humedecimiento

Independientemente de la exposición media anual que pueda caracterizar a cada orientación de fachada en cada emplazamiento, existen también fenómenos meteorológicos concretos que provocan aumentos significativos de dicha exposición durante períodos de tiempo concretos (gota fría, borrascas, etc).

Estos eventos meteorológicos pueden provocar humedecimientos significativos de las fachadas, que quedarían sin embargo difuminados en el índice de exposición medio anual. Así pues, el estándar ISO establece un procedimiento complementario para caracterizar la exposición durante estos períodos de humedecimiento singulares, permitiendo con ello una caracterización completa de la casuística de eventos de humedecimiento que pueden afectar a las fachadas.

Para determinar esta exposición de corta duración, la norma introduce el concepto de *periodo de humedecimiento*, entendido como la acumulación de aportes de lluvia batiente sobre la orientación de fachada limitados por la ocurrencia de, al menos, 96 horas sin lluvia batiente [13]. Así, a lo largo de cada año es posible identificar múltiples períodos de humedecimiento distintos, cada uno caracterizado por la suma de la lluvia batiente recibida a lo largo de los mismos.

Estas 96 horas sin lluvia batiente se consideran suficientes para que la evaporación se convierta en predominante, habiendo restaurado el estado inicial de humedecimiento de la fachada previo a recibir la lluvia batiente (momento en el cual se puede volver a contabilizar un nuevo periodo de humedecimiento) [13, 9].

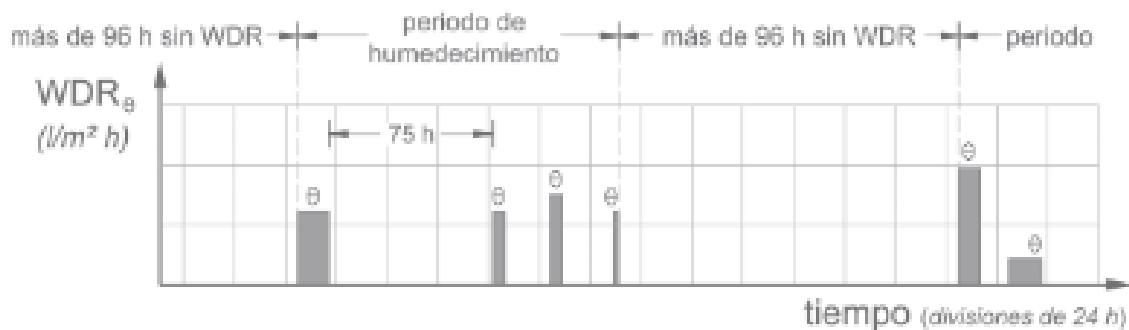


Figura 15: Definición del periodo de humedecimiento

La cantidad de lluvia batiente acumulada durante cada periodo de humedecimiento I'_s (mm/periodo), en cada posible orientación de fachada, se determina mediante la fórmula 2:

$$I'_s = \frac{2}{9} \sum v r^{8/9} \cos(D - \theta)$$

Fórmula 2: Lluvia batiente por periodo de humedecimiento

Partiendo de los mismos registros meteorológicos horarios utilizados en la fórmula 1, el sumatorio considera en esta ocasión únicamente aquellas horas contenidas dentro del periodo de humedecimiento en los que el término coseno es positivo, es decir, en los que la lluvia batiente impacta sobre la fachada. Como para el cálculo anual, es necesario un cálculo diferenciado para cada posible orientación de fachada, que, de nuevo, se ha discretizado en 24 intervalos de 15°.

Cálculo de la lluvia batiente máxima de referencia I_s

A tenor del cálculo anterior, resulta evidente que se van a obtener, para cada fachada, emplazamiento y año, múltiples valores I'_s (mm/periodo). Se hace necesario, por tanto, caracterizar un único valor de referencia, representativo de las exposiciones asociadas a estos periodos de humedecimiento, que sea comparable con el de otros emplazamientos u orientaciones de fachada.

Para ello, se determina el máximo valor $l's$ que puede repetirse cada 3 años, es decir, con un periodo de retorno de 3 años. Este valor máximo, identificado como $l's$ (mm/periodo) se determina a partir de los valores $l's$ máximos anuales mediante la función de Gumbel, tal y como se explica a continuación [21].

Mediante esta función, la recurrencia anual de un determinado valor x de una magnitud climática puede determinarse a partir de la moda u y dispersión β de la serie de registros máximos anuales de dicha variable x :

$$TR(x) = \frac{1}{1 - e^{-\alpha(x-u)}} ; \frac{1}{TR(años)} = 1 - e^{-e^{-(x-u)/\beta_x}}$$

Fórmula 3: Periodo de retorno

En la fórmula se establece el periodo de retorno TR [años], donde x , es la variable de estudio, es decir, se calcula la probabilidad de que un valor de magnitud igual o superior a “ x ” se repita en un determinado periodo de años [21]. La formulación desarrollada de este cálculo necesario se recoge en el **Anexo IV**. El mismo se ha utilizado para determinar el máximo valor $l's$ que puede producirse cada 3 años (obteniendo así el valor de referencia $l's$) y también, los diferentes valores de precipitación y velocidad de viento esperables con periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Análisis de los registros meteorológicos

Los datos empleados, con una antigüedad de 10 años en cada estación, han sido obtenidos gracias a la aplicación Mi SIAR proporcionada por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Inicialmente, se solicitaron los datos correspondientes a todas las estaciones de cada comunidad autónoma, referentes a velocidad y dirección del viento y precipitaciones. Una vez aprobada la solicitud, se permitió la descarga de todos los datos en formato Excel, donde en cada columna de cada estación se encontraban los datos necesarios [14].

Sin embargo, muchas de las hojas descargadas se encontraban sin datos suficientes para hacer el estudio, por lo que se realizó una criba inicial de estaciones, descartando aquellas que no poseían datos con una antigüedad mínima de 10 años.

Una vez seleccionadas las estaciones meteorológicas indicadas en el anterior apartado 2, se procedió a agrupar los datos y obtener las series horarias necesarias para la aplicación del estándar ISO 15927-3. Esta agrupación de datos se tuvo que hacer ya que en

todas las estaciones se habían descargado datos 30-minutales. Para ello, utilizando Excel, se sumaron los datos 30-minutales de lluvia de dos en dos, mientras que para obtener la velocidad y dirección de viento horaria se realizó un promedio y suma vectorial de dos valores 30-minutales:

$$\text{Dirección horaria} = \tan^{-1}\left(\frac{\sum -\sin \theta}{\sum -\cos \theta}\right)$$

Fórmula 4: Dirección horaria a partir de registros 30-minutales

Una vez agrupados los datos horarios, se observó también que en muchos casos existían datos 30-minutales vacíos. En estos casos, se adoptó el criterio de considerar igualmente vacío o nulo el dato horario correspondiente. La mayoría de las estaciones meteorológicas disponían de un número de datos válidos cercano al 100%. No obstante, se han descartado aquellas con menos de un 70% de datos válidos y con menos de 10 años de registros, garantizando de esta forma la adecuada representatividad de los resultados obtenidos. De todas las comunidades autónomas estudiadas, el menor porcentaje obtenido de datos válidos se identifica en la Comunidad Foral de Navarra, con un 90.987% de media.

Cabe destacar que en algunas estaciones meteorológicas hubo de realizarse un paso de filtrado añadido, ya que las fechas registradas a veces contenían saltos temporales que no se veían reflejadas por un dato en blanco o vacío. Para ello, se empleó otra hoja Excel en la que se comparaban las fechas descargadas con las fechas reales que deberían aparecer, insertando en las fechas ausentes también un dato vacío.

Es decir, se partía de una columna con las fechas y horas totales en las que debería haber datos y, posteriormente, se insertaban las fechas y horas en las que se correspondían los datos de las estaciones meteorológicas. Se realizaba la comparación entre las distintas fechas y se colocaban de forma ordenada los datos de las mismas, de tal manera que se insertaban celdas vacías en las que no correspondían datos para poder cuantificarlos más tarde de una forma más eficaz y sencilla. Las estaciones con este tipo de ausencia de fechas registradas corresponden a las que mayor porcentaje de falta de datos han dado, pero, aun así, seguían teniendo los suficientes para no poder descartarlas (más del 70% de datos horarios válidos). Ambos filtrados supusieron una tarea tediosa y laboriosa, ya que la cantidad de datos a filtrar fue muy elevada.

Utilizando hojas Excel, cada estación contaba inicialmente con 175297 filas, es decir, 10 años completos con las 24 horas de cada día y los datos treinta-minutales.

Finalmente, una vez realizado el filtrado de datos y el cálculo de las medias para obtener los datos de forma horaria, se obtuvieron 87649 filas, que constituyeron los datos empleados para los posteriores cálculos relativos al estándar ISO 15927-3.

Análisis de los datos

Una vez constituidas las series horarias filtradas, éstas fueron copiadas a otra Hoja Excel, utilizada para todos los cálculos sobre lluvia batiente. La hoja de cálculo de la lluvia batiente dispone de distintas partes:

- La primera son columnas reservadas para copiar los datos filtrados;
- La segunda comprende los distintos cálculos necesarios para caracterizar la lluvia batiente incidente, de forma horaria, en cada posible orientación de fachada θ . Estas direcciones van desde $\theta = 0^\circ$, en incrementos de 15° , hasta llegar a $\theta = 345^\circ$, considerando que cuando $\theta = 0^\circ$ es norte, $\theta = 90^\circ$ este, $\theta = 180^\circ$ sur y finalmente $\theta = 270^\circ$ oeste.

Ambas partes son para el cálculo de lluvia batiente media anual. Debajo de las orientaciones del cerramiento se calcula el promedio anual I_A para cada una de las orientaciones de fachada.

La tercera parte permite el cálculo de la lluvia batiente máxima de referencia. En ella, se reservan varias columnas para copiar los datos de lluvia batiente incidente en cada orientación de fachada (ya calculado en la parte 2). El cálculo de los valores I 's asociados a cada periodo de humedecimiento que se produce a lo largo de cada año para cada una de las orientaciones de fachada consideradas se realiza mediante un macro de Excel, que permite identificar de forma automática la existencia de intervalos de al menos 96 horas sin aporte de lluvia batiente (es decir, el criterio de inicio-final de cada periodo de humedecimiento).

El código utilizado para la Macro de Excel se muestra a continuación:

Sub contar()

NumRows = Range("A1", Range("A1").End(xlDown)).Rows.Count

For Col = 1 To 24

ColRes = Col + 25

Sum = 0

Lim = 0

```
For Fila = 2 To NumRows
    Value = Cells(Fila, Col)
    Fila2 = Fila - 96
    If Sum = Sum + Value Then
        Lim = Lim + 1
    Else
        Sum = Sum + Value
        Lim = 0
    End If
    If Lim = 96 And Sum > 0 Then
        Cells(Fila2, ColRes) = Sum * 2 / 9
        Lim = 0
        Sum = 0
    End If
    Next

    If Sum > 0 Then
        Fila = Fila - 1
        Cells(Fila, ColRes) = Sum * 2 / 9
    End If

    Next Col
End Sub
```

Haciendo un barrido de todas las filas y columnas, debe sumar el valor individual de todas las celdas que contienen lluvia batiente (valor superior a 0) desde el último periodo en el que se habían producido 96 horas sin lluvia batiente hasta que se produzca otro y multiplicarlo por el coeficiente 2/9 como establece la norma. Es decir, la suma de los valores individuales de lluvia batiente asociados al periodo de humedecimiento multiplicado por 2/9.

Debajo de las filas anteriores se introdujeron las fórmulas correspondientes al cálculo de I_S para un periodo de retorno de 3 años, tal y como se explica en el apartado anterior y en el **Anexo IV**.

RESULTADOS

El análisis realizado ha permitido obtener un gran número de resultados, los cuales se han intentado presentar de diferentes formas para facilitar su interpretación y análisis:

Fichas meteorológicas

En primer lugar, una vez identificados los valores I_A e I_S para cada emplazamiento y orientación de fachada, éstos se tenían que ver reflejados de forma visual y clara, para lo cual se crearon las siguientes hojas resumen que van a ser explicadas apartado por apartado. Todas las fichas meteorológicas se encuentran recogidas en el [Anexo III](#). Para cada una de las estaciones se han elaborado 3 fichas, que componen la hoja resumen de la estación:

Ficha 1:

En primer lugar, en la parte superior se presenta el nombre de la estación y la Comunidad Autónoma a la que corresponde, así como la altitud, latitud, longitud y huso [UTM]. También se señalan los años de registros analizados y el porcentaje de los datos válidos tanto de precipitación como de viento.

Una vez presentados estos datos identificativos, en la siguiente parte, se muestra la pluviometría media anual (mm) de cada estación y la velocidad media del viento (m/s), obtenida a partir de todos los registros analizados en la estación.

En la parte inferior de la ficha se representa la distribución direccional de la exposición, mediante gráficos circulares. A la izquierda, se recogen los valores de I_A (mm/año) para cada orientación de las fachadas, así como datos más relevantes: resultados máximos y mínimos y la orientación de fachada en la que se producen.

A la izquierda, el gráfico circular representa la exposición de referencia vinculada a períodos de humedecimiento, para cada una de las orientaciones de fachada analizada. En este caso, también aparecen los valores máximos y mínimos de I_S (mm/periodo), así como la orientación de fachada en la que se producen. Se muestra a continuación, a modo de ejemplo, la ficha correspondiente a la estación meteorológica de Cadreita, en la Comunidad Foral de Navarra:

NAVARRA			
ESTACIÓN:		Cadreita	
DATOS DE LA ESTACIÓN			
ALTITUD (m)	267,0	AÑOS ANALIZADOS	10 (2013-2022)
LATITUD (UTM)	4673640,0	DATOS VÁLIDOS LLUVIA (%)	94,6
LONGITUD (UTM)	605802,0	DATOS VÁLIDOS VIENTO (%)	94,6
HUSO	30,0	PROVINCIA	Navarra
RESULTADOS GENERALES			
Pluviometría media anual (mm)	406,9		
Vel. media de viento -dato horario- (m/s)	2,5		
DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL DE LA EXPOSICIÓN			
EXPOSICIÓN ANUAL $I_a [l/(m^2·año)]$		EXPOSICIÓN POR PERÍODO DE HUMEDECIMIENTO $I_s [l/m^2]$	
Orientación del máximo (º)	315	Orientación del máximo (º)	300
Orientación del mínimo (º)	60	Orientación del mínimo (º)	45
Máx. valor direccional (l/m^2)	168,1	Máx. valor direccional (l/m^2)	55,9
Mín. valor direccional (l/m^2)	30,9	Mín. valor direccional (l/m^2)	10,4

1/3

Figura 16: Ficha técnica 1 de datos relevantes de cada estación

Ficha 2:

En esta ficha se presentan los valores de intensidad de precipitación, velocidad de viento y velocidad de viento simultáneo a la lluvia, que se espera se produzcan con una recurrencia de 5, 10, 25, 50 y 100 años (periodos de retorno de cálculo en cada uno de los casos).

Considerando los valores máximos de intensidad de lluvia (mm/min), viento y viento simultáneo con lluvia de cada uno de los años (m/s), se ha realizado el promedio en

distintos intervalos de tiempo: cada 60 minutos, 360 min, 480 min, 720 min y 1440 min (1 día).

Esto ha permitido no solo estimar los valores asociados a distintos períodos de retorno para eventos horarios, sino también los vinculados a otros intervalos de registro de mayor duración. Este tipo de caracterizaciones intensidad-duración-frecuencia (curvas IDF) resultan de interés en diferentes ámbitos de la ingeniería: por ejemplo, las asociadas a intensidad de precipitación se utilizan para la previsión de avenidas de agua y para el dimensionado de redes de alcantarillado en ciudades, como es el caso de la ciudad de Zaragoza:

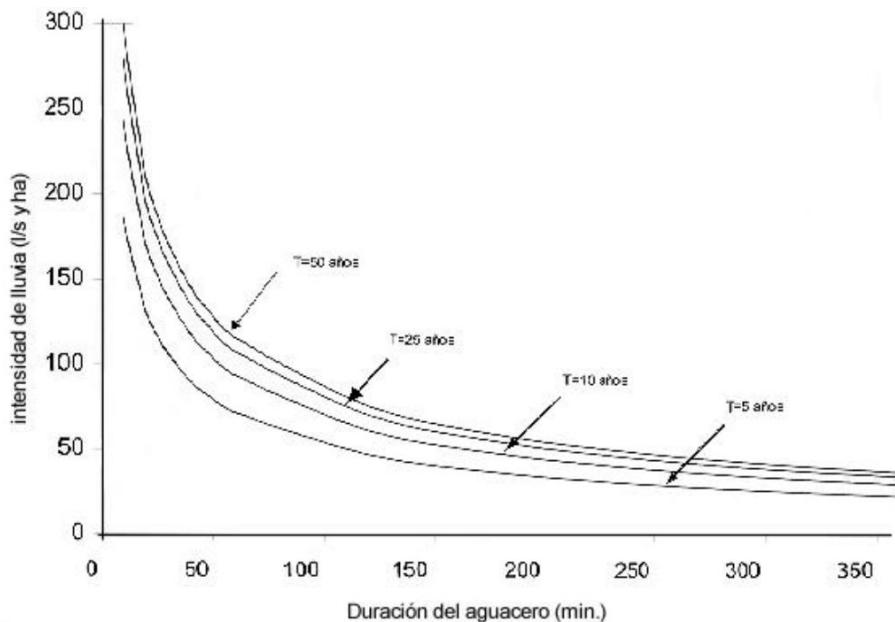


Figura 17: Curva IDF recogida en el Plan General de Ordenación Urbana de Zaragoza, Anejo 6, Infraestructuras:

Se aplicó la distribución de Gumbel para conseguir los períodos de retorno deseados sobre los valores máximos promediados para cada intervalo de tiempo.

A la derecha de la ficha, se muestran unas gráficas en las cuales, en el eje X, se representan los minutos previamente mencionados y en el eje Y la intensidad de lluvia, velocidad de viento y velocidad de viento simultáneo a la precipitación. En cada gráfica se ha obtenido la regresión más adecuada entre los diferentes intervalos de tiempo analizados, siendo de tipo potencial en el caso de la intensidad de precipitación y de tipo logarítmico en el caso del viento. Del mismo modo, se presenta el coeficiente de determinación obtenido y la expresión matemática de la correlación identificada.

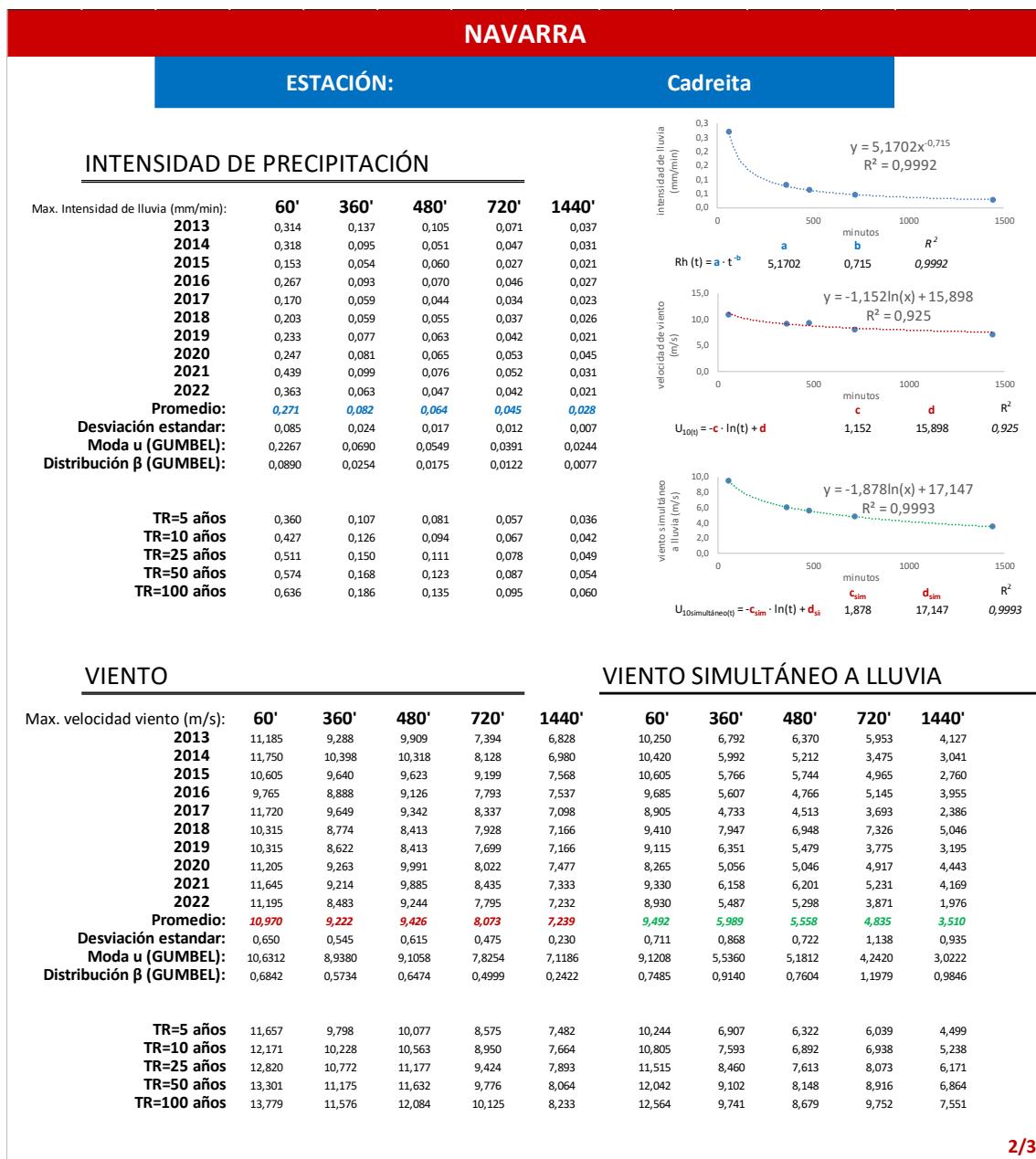




Figura 19: Ficha técnica 3 de datos relevantes de cada estación

Fichas resumen

Una vez elaboradas todas las estaciones estudiadas, se recopilaron los datos más relevantes de todas ellas para poder hacer una comparativa más sencilla y visual. Todos estos datos se pueden observar en el [Anexo I](#), a modo de resumen general.

Las variables consideradas en este resumen de datos de las estaciones han sido las siguientes:

Variables	Unidades
X	UTM
Y	UTM
Huso	UTM
Datos válidos	%
la max	l/m ² *año
ls max	l/m ² *periodo de humedecimiento
Lluvia media	l/m ²
Viento medio	m/s
Lluvia 60'	l/m ² *min
Lluvia 360'	l/m ² *min
Lluvia 480'	l/m ² *min
Lluvia 720'	l/m ² *min
Lluvia diaria	l/m ² *min
Viento 60'	m/s
Viento 360'	m/s
Viento 480'	m/s
Viento 720'	m/s
Viento diario	m/s
Viento sim 60'	m/s
Viento sim 360'	m/s
Viento sim 480'	m/s
Viento sim 720'	m/s
Viento sim diario	m/s
Grado de impermeabilidad	

Figura 20: Variables estudiadas y sus unidades

Mapas de exposición

Partiendo de los resultados obtenidos en las hojas resumen, se procedió a elaborar mapas de resultados que permitieran una mejor interpretación gráfica de los resultados obtenidos. Para ello, los valores I_A e I_s fueron representados mediante mapas de isolíneas relativos a las diferentes regiones analizadas.

En estos mapas, cada estación se introdujo como un punto definido por sus coordenadas UTM (longitud y latitud; X e Y respectivamente), mientras que la variable Z (altura), se asignó al máximo valor direccional de I_A e I_s identificado en dicha estación. Con el mapa de puntos resultante se realizó un levantamiento topográfico del terreno, en el que

las curvas de nivel (isolíneas), representan los valores de exposición en lugar de altitud topográfica. El programa utilizado para la elaboración de estos mapas fue la versión 2020 del software BIM Allplan de la empresa alemana Nemetshek, utilizando su módulo específico para este fin. Una vez ejecutado el levantamiento topográfico, los mapas se descargaron en formato .dwg para su edición mediante AutoCAD.

En el primer mapa, se ha representado la máxima exposición direccional anual a la lluvia batiente, I_A (mm/año). Se puede observar de una forma muy clara, que donde hay acumulación de isolíneas representa mayores variaciones de lluvia batiente. Cuando estas líneas están más distanciadas, representa lo contrario, menor variación en la exposición de lluvia batiente a lo largo del territorio.

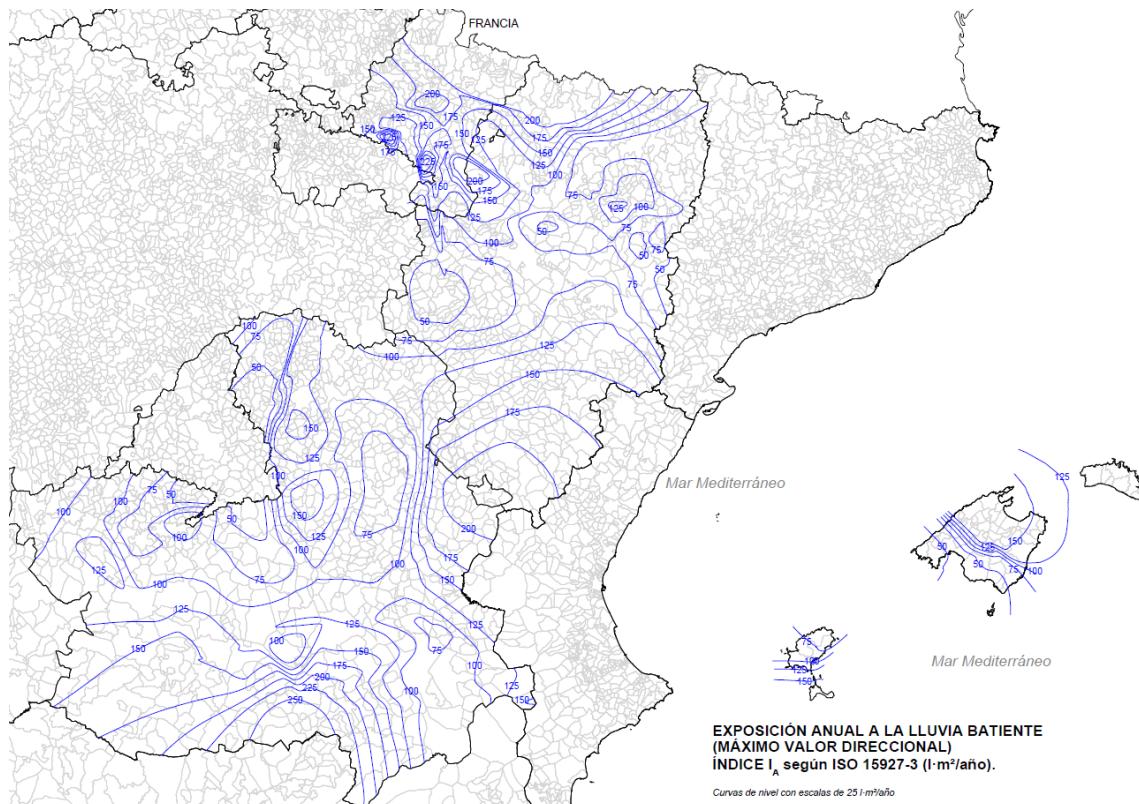


Figura 21: Mapa de exposición asociado a la

Como se observa, las mayores variaciones de exposición se producen en la Comunidad Foral de Navarra y en Islas Baleares, donde existe una rápida transición entre llanuras y zonas montañosas.

El valor máximo de exposición anual se identifica en el emplazamiento de Funes, con una precipitación acumulada en las fachadas de 246,8 mm/año sobre la orientación 315º. El punto se sitúa cerca del parque natural de Izki, una zona montañosa próxima al límite occidental de Navarra, un emplazamiento sometido a fuertes vientos simultáneos a precipitaciones. El valor máximo direccional de menor magnitud se identifica en la provincia de Toledo, en el emplazamiento de Villarubia de Santiago, situado en el norte de la provincia, debido al clima seco de la región, alcanzando apenas 39,24 mm/año sobre la orientación 270º (la más expuesta del emplazamiento).

La zona pirenaica en Aragón y Navarra, y el Parque Natural de los Valares del Mundo y de la Sima, en Albacete, presentan en general los valores más elevados de exposición. Por el contrario, el Bajo Aragón y amplias zonas de Castilla la Mancha en las provincias de Guadalajara y Toledo presentan valores con exposiciones de lluvia batiente sobre las fachadas muy reducidas (sin superar 100 mm/año).

En general, la exposición más elevada en fachadas de Aragón y Navarra se da en aquellas con orientaciones comprendidas entre 270º - 45º, considerando el norte como 0/360º. Los vientos procedentes del Cantábrico, predominantes en la zona (norte-noroeste), a veces acompañados de precipitación, explican la mayor exposición en estas orientaciones. Es de destacar, que no solo las orientaciones expuestas presentan similitudes; también los valores máximos de cada comunidad son similares: en Navarra, Funes (246,8 mm/año) y en Aragón, el emplazamiento de Santa Cilia de Jaca (Huesca), con un valor de 215,9 mm/año.

La velocidad máxima de viento se da en el emplazamiento de las Bardenas Reales en Navarra (3,7 m/s), situado en el centro de la Comunidad. Esto se debe a la proximidad a la Reserva Natural de los Sotos del Ebro y su proximidad al río Ebro, el cual se caracteriza por la elevada velocidad del viento en su valle. Si solo consideramos la velocidad de viento simultáneo a lluvia, este emplazamiento es también el que registra una mayor velocidad, alcanzando 9,7 m/s.

Por el contrario, en Castilla La-Mancha, las fachadas más expuestas se identifican en el suroeste de la comunidad, sobre fachadas con orientaciones 165º y 285º aproximadamente, debido a la rotación que llevan los vientos que acompañan a las borrascas, este es de sentido antihorario y provocan vientos del suroeste que acompañan a las precipitaciones.

En las Islas Baleares, las orientaciones más expuestas de las fachadas son entre los 0º y 90º, ya que, debido a fenómenos meteorológicos como la gota fría, se caracteriza por vientos provenientes del noreste, como es el viento Gregal, muy característico de las Islas Baleares.

En el segundo mapa, se ha representado el máximo valor direccional I_s , como ocurre en el anterior mapa, una mayor densidad de isolíneas representa una mayor acumulación de lluvia batiente.

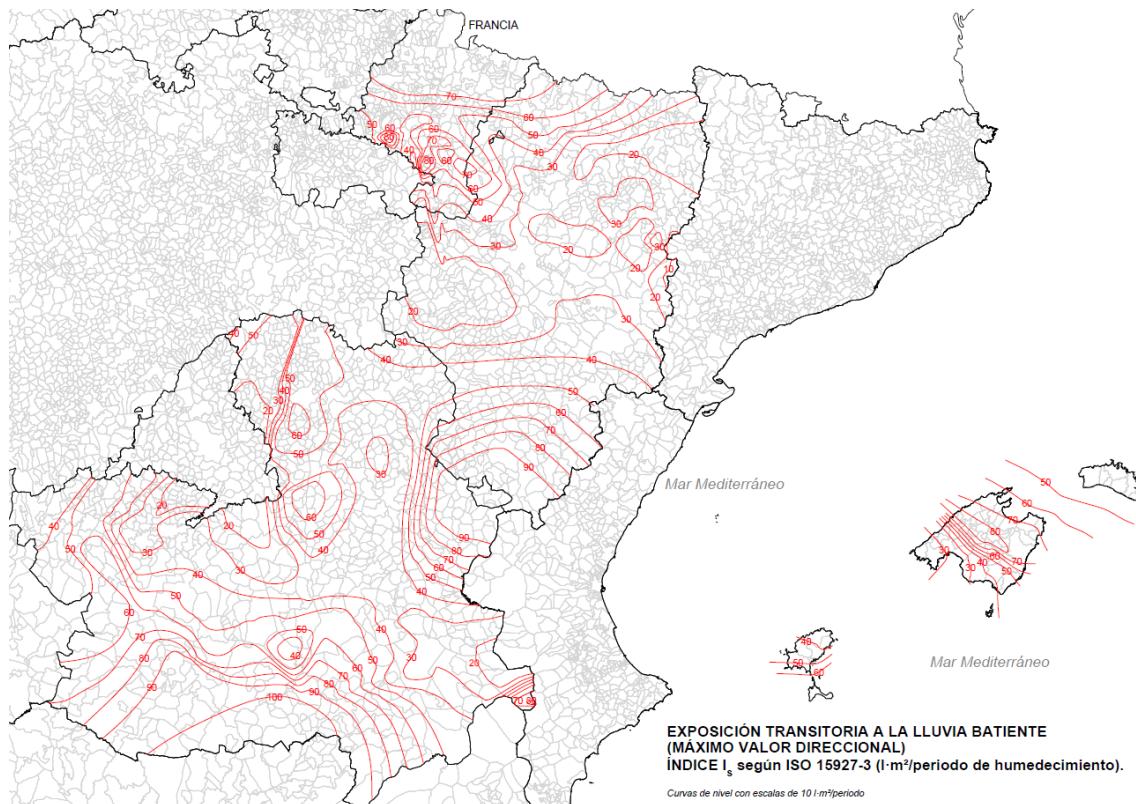


Figura 22: Mapa de exposición asociado a I_s

En el segundo mapa, se ha representado el máximo valor direccional I_s , como ocurre en el anterior mapa, una mayor densidad de isolíneas representa una mayor acumulación de lluvia batiente.

En este caso las mayores variaciones de exposición vuelven a producirse en la Comunidad Foral de Navarra y en las Islas Baleares, dado a que la superficie se caracteriza por tener extensas llanuras junto a regiones montañosas.

El valor máximo de exposición por periodo de humedecimiento se identifica en Funes, con una precipitación de 85,1 mm/periodo de humedecimiento (esperable una vez cada tres años), o Sesma, con 82,7 mm/periodo de humedecimiento. Ambas poblaciones

se encuentran en el noreste de la Comunidad Foral de Navarra y ambos valores se presentan en fachadas orientadas al noroeste (285º- 315º).

Es destacable, que el segundo máximo se encuentra en las Islas Baleares, en el emplazamiento de Inca, situado al norte de la Isla de Mallorca. Ello puede explicarse por la acción de las gotas frías, capaces de descargar grandes cantidades de agua en cortos periodos de tiempo. El valor máximo alcanza 83,6 mm/periodo de humedecimiento sobre las fachadas en la orientación 45º.

El valor máximo direccional más reducido se vuelve a encontrar en Toledo, en dos emplazamientos como son Villarrubia de Santiago y en Recas, con valores inferiores a 17 mm/periodo de humedecimiento, sobre las orientaciones 255º y 90º, respectivamente. Recas se encuentra en el centro de la provincia sobre un gran llano, mientras que Villarrubia de Santiago se encuentra en el norte. Esta diferente ubicación explica la diferencia entre las orientaciones expuestas, ya que los vientos predominantes simultáneos a las precipitaciones en cada uno de los emplazamientos provienen de direcciones distintas.

Cabe destacar que amplias zonas de la provincia de Huesca tienen valores reducidos, dado a que estos se encuentran en la parte central de la provincia en la comarca del Cinca Medio, caracterizada por escasas precipitaciones.

Los resultados en ambos mapas son muy similares, aunque se aprecia un fuerte incremento de la exposición asociada a periodos de humedecimiento en zonas afectadas por el fenómeno de la gota fría. Es el caso de las Islas Baleares y del sureste de la provincia de Albacete. En el resto del territorio, se tiene los resultados esperados, ya que gran parte de Aragón tiene un clima muy seco y gran parte de Castilla- La Mancha también.

Estos mapas meteorológicos se pueden observar con mayor detalle en el [Anexo II](#).

DISCUSIÓN

El propósito de este trabajo no es tan solo caracterizar la exposición de las fachadas a la lluvia batiente en regiones del este de España, sino demostrar fehacientemente la escasa precisión y fiabilidad aportada por el método establecido actualmente por el Código Técnico de Edificación para determinar el grado de exposición a las que se ven sometidas las fachadas de los edificios (grado de humedecimiento).

Como se comentó previamente, el CTE establece una forma de cálculo rudimentaria, considerando un grado de exposición al viento en determinadas zonas, rangos de alturas en el edificio y la zona eólica en la que se encuentra el emplazamiento. Después, asigna unos valores del 1 al 5 de grado de impermeabilidad, dependiendo de la pluviometría media anual en el emplazamiento. Cuanto mayor sea el grado de impermeabilidad, más exigentes son el diseño y las condiciones de construcción de las fachadas a utilizar. Sin embargo, este procedimiento soslaya el factor esencial, que es la simultaneidad entre viento y lluvia que realmente da lugar a la lluvia batiente.

A continuación, se va a comparar el resultado I_A obtenido mediante la aplicación del estándar internacional ISO 15927-3, con el grado de impermeabilidad requerido por el CTE en el mismo emplazamiento.

Para ello, se consideran edificios de altura inferior o igual a 10 metros de altura (equivalente con la altura del anemómetro que registra los datos de viento en las estaciones meteorológicas analizadas) y un terreno rural llano y despejado sin obstáculos ni arbolado de importancia (terreno tipo II), ya que son normalmente las condiciones en las que se encuentran estas estaciones meteorológicas (clase del entorno del edificio E0). De este modo, se garantiza la equivalencia en las condiciones de contornos consideradas por ambos procedimientos de cálculo.

Consultando la Figura 3, se han considerado las distintas zonas eólicas presentes en las CC.AA. analizadas. No obstante, se observa que para edificios de menos de 15 m en terreno de clase E0, el grado de exposición al viento establecido por el CTE es siempre igual a V2 (véase tabla 1).

Para obtener el grado de impermeabilización requerido en cada emplazamiento por el CTE debe consultarse la Tabla 2, consultando la zona pluviométrica de promedios establecida en la Figura 2:

- En la Comunidad Foral de Navarra e Islas Baleares el territorio se divide entre la zona pluviométrica de promedios III y IV, obteniendo un grado de impermeabilidad de 3 para ambos casos.
- En Aragón, además de la zona IV con un grado de impermeabilidad 3, también hay una estación meteorológica en zona V, siendo el grado de impermeabilidad 2.
- En Castilla La-Mancha, aunque predomina la zona pluviométrica IV, nos encontramos zona III y II también con grado de impermeabilidad 3 y 4 respectivamente.

Recopilando estos grados de impermeabilidad (GE) requeridos y comparándolos gráficamente con los máximos valores direccionales I_a (mm/año) identificados en cada emplazamiento, se puede observar como no existe correlación entre el grado de impermeabilidad requerido por el CTE y el aporte real de agua de lluvia que reciben las fachadas de los edificios:

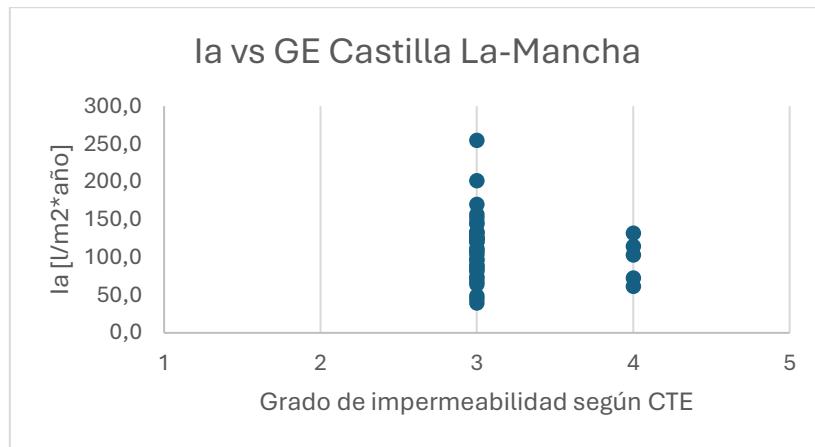


Figura 23: Grados de impermeabilidad en Castilla La-Mancha

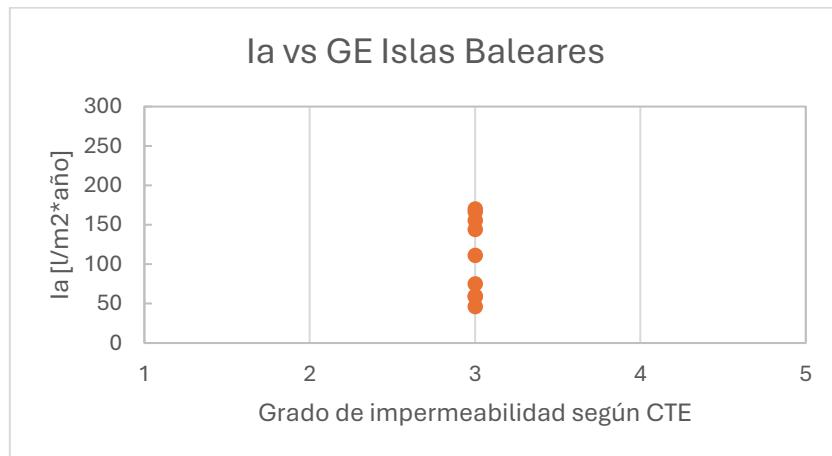


Figura 24: Grados de impermeabilidad en las Islas Baleares

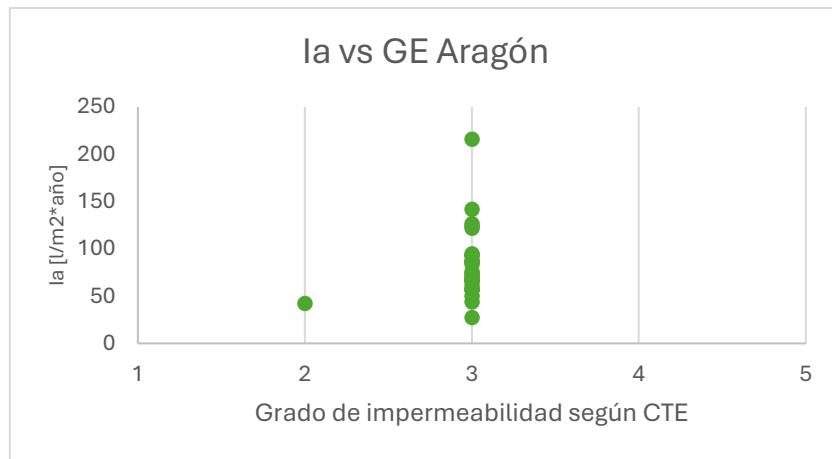


Figura 25: Grados de impermeabilidad en Aragón

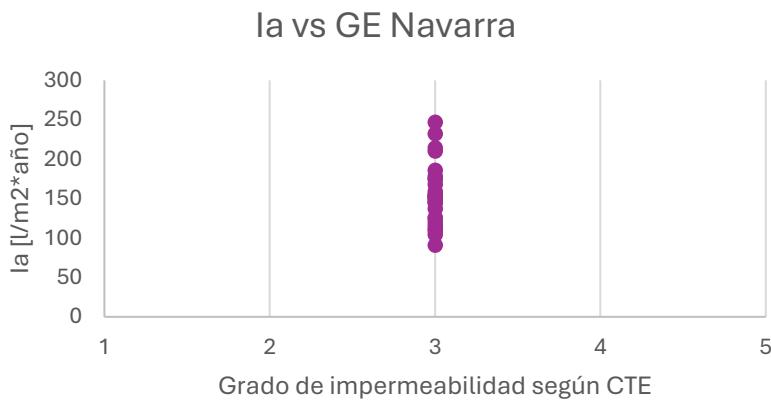


Figura 26: Grados de impermeabilidad en Navarra

Como se observa, en un mismo grado de impermeabilidad pueden llegar a integrarse emplazamientos con aportes de lluvia batiente en sus fachadas muy diferentes entre sí. Así, es posible encontrar emplazamientos con valores superiores a 250 l/m²·año a los que se les aplica el mismo diseño de cerramientos que emplazamientos con exposiciones inferiores a 50 l/m²·año (una quinta parte del valor anterior).

Por su parte, en Castilla La Mancha, incluso se aprecia cómo se asignan grados de impermeabilidad más altos a emplazamientos con exposiciones a la lluvia batiente significativamente bajos. De forma inversa, se puede observar como valores muy próximos de I_A pueden asignarse a distintos grados de impermeabilidad (como ocurre tanto en Aragón como en Castilla La-Mancha), estableciendo así condiciones de diseño diferentes para fachadas que, en realidad, presentan una solicitud frente a la humedad atmosférica similar.

Si se agrupan los datos de las cuatro CC.AA. analizadas en un mismo gráfico, es posible afectar esta falta de fiabilidad del CTE DB-HS1 incluso con mayor claridad:

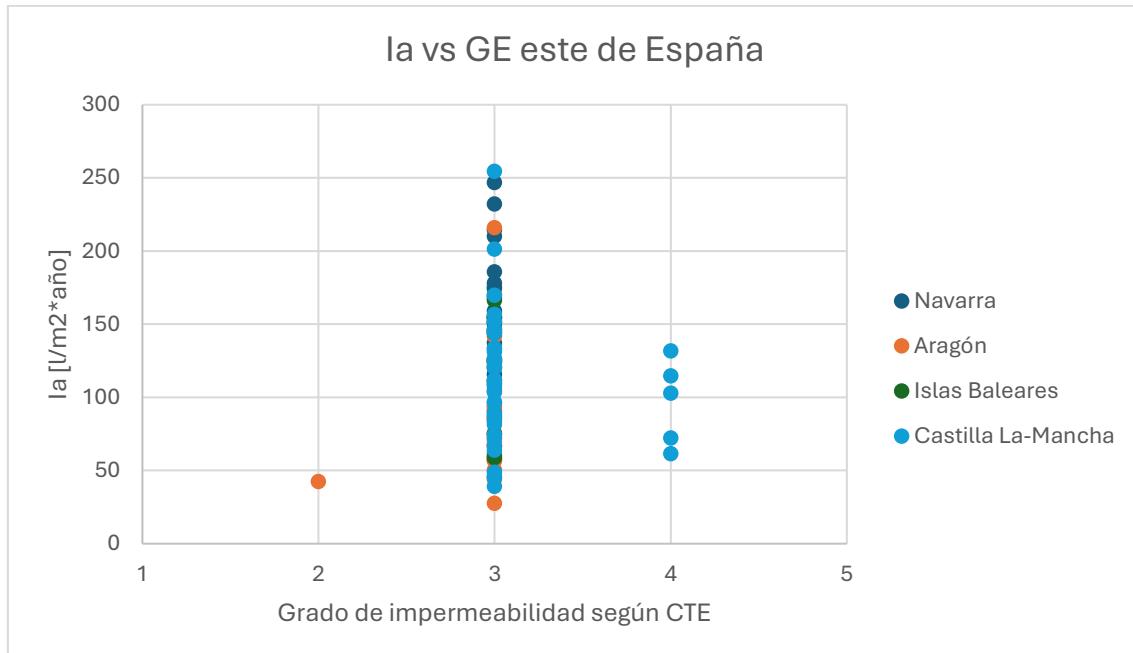


Figura 27: Grados de impermeabilidad en el este de España

La forma ideal de las gráficas anteriores sería una representación escalonada de los valores l_a en los diferentes grados de impermeabilidad, hecho que no se produce. La falta de correlación entre el CTE y el estándar aceptado internacionalmente resulta evidente y conlleva que, en la práctica, puedan asignarse requerimientos de diseño inadecuados para las fachadas:

- Por exceso, asignando soluciones constructivas realmente innecesarias, lo que supone un despilfarro de recursos y un sobrecoste asociado a la construcción de los edificios.
- Por defecto, incumpliendo el requisito básico de proporcionar una protección adecuada ante la penetración indebida de agua atmosférica al interior de los edificios, resultando, como ya se ha dicho al inicio, en afecciones a la durabilidad de las fachadas, en una reducción de la eficiencia de la envolvente térmica del edificio e incluso, en afecciones para la salud de los usuarios de los inmuebles.

CONCLUSIÓN

En la vida real tanto los proyectos más complejos como los proyectos más simples, siempre se dividen en tareas, de tal forma que, cumpliendo con unos plazos razonables en el tiempo, permitan llegar a un objetivo o meta. Este trabajo requería de muchas tareas, las cuales han tenido que ser marcadas previamente sobre papel para llegar a la fecha establecida, y cada tarea requería de un tiempo y esfuerzo distinto.

La tarea más larga y laboriosa fue el análisis de tan gran número de datos, los cuales han tenido que ser descargados, ordenados y filtrados, correspondientes a un gran número de estaciones. Además, los mismos se tuvieron que conseguir a través de solicitudes al Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación que se dilataron bastante en el tiempo.

Analizar las variables del trabajo me ha demostrado la gran importancia que tiene contar con numerosos datos de partida para poder hacer cualquier tipo de estudio de una forma fiable, con muy pocas aproximaciones y errores en los cálculos.

La siguiente tarea, además la más importante, fue el cálculo de la exposición media anual de las fachadas a la lluvia batiente en cada orientación. Para cada una de las estaciones, esta tarea ha permitido establecer una caracterización muy precisa de los valores de exposición y ver las grandes diferencias entre cada una de las Comunidades Autónomas estudiadas, entre emplazamientos de una misma región y entre las diferentes orientaciones de fachada de un mismo emplazamiento.

Una vez obtenidos los valores calculados de todas las estaciones meteorológicas, llegó el momento de plasmarlos de forma visual para poder plasmar las conclusiones a través de mapas de exposición. Gracias a éstos se pudo corroborar la influencia de la topografía, vientos dominantes y regímenes climáticos, en las exposiciones provocadas por la lluvia batiente. Así, tanto Navarra o las Islas Baleares, que se caracterizan por precipitaciones mayores que el resto de los emplazamientos o bien por la ocurrencia de fenómenos de precipitación de gran intensidad y corta duración, demostraron en estos mapas la existencia de una mayor exposición a la humedad atmosférica en sus fachadas. Por su parte, Aragón y Castilla-La Mancha, caracterizados por climas más secos y áridos, demostraron valores de lluvia batiente sobre la fachada inferiores en general.

Así, la exposición media anual en la fachada más expuesta de cada emplazamiento oscila entre 246,8 l/m²·año en Funes, emplazamiento situado en la Comunidad Foral de

Navarra y 39,24 l/m²·año, valor mínimo situado en Villarrubia de Santiago, en la provincia de Toledo.

Si atendemos al valor de exposición asociado a períodos de humedecimiento, el valor máximo dirección se identifica en Funes (85,1 l/m²·periodo), mientras que el emplazamiento menos expuesto sería Villarrubia de Santiago, con 13,22 l/m²·periodo de humedecimiento.

Finalmente, como último objetivo de este trabajo, se ha comparado la caracterización elaborada mediante la norma ISO 15927-3 con el grado de impermeabilidad mínimo requerido por el Código Técnico de Edificación. Al ser una normativa de obligatorio cumplimiento, se debe esperar de ella una fiabilidad completa, para no cometer fallos que puedan comprometer la habitabilidad y salubridad del edificio. No obstante, no siempre es esto así, ya que se han constatado las incongruencias metodológicas apuntadas en algunos estudios en relación al diseño de los cerramientos de las fachadas. Se han calculado todos los grados de impermeabilidad asociados a los emplazamientos de cada una de las estaciones meteorológicas, siguiendo con lo estipulado en el CTE, y los resultados obtenidos no presentan convergencia alguna con los valores de exposición obtenidos mediante la norma internacional.

Todo este estudio me ha presentado una gran duda, ya que, si para el estudio y diseño de los cerramientos de las fachadas, el CTE se ha quedado obsoleto o incompleto, se puede llegar a esperar lo mismo para más variables de diseño recogidos en esta normativa. Tal vez sea por la antigüedad de la misma, por falta de recursos cuando se estableció o incluso, por pequeños fallos de aproximación, pero estos errores pueden generar importantes afecciones a la durabilidad de los edificios a largo plazo.

Aunque este trabajo tan solo ha analizado emplazamientos del este de España, cabe esperar que, para el resto de territorio nacional, ocurra lo mismo. Los resultados pueden ser extrapolados y se presuponen unas conclusiones similares en relación a la incoherencia y falta de fiabilidad del CTE (apenas se observan cambios en la convergencia entre ambas notas entre las cuatro CC.AA. estudiadas).

Este trabajo, personalmente, me ha ayudado a aprender mucho sobre temas completamente desconocidos, aprender la importancia de realizar cálculos y diseños rigurosos y a basarse en herramientas contrastadas, como el estándar ISO 15927-3. También y creo que lo que más me ha enseñado este trabajo es a tener una visión crítica: no siempre lo que se hace desde siempre o porque lo marca una normativa, implica que

esté bien hecho. Firmemente creo que, trabajos de investigación de este tipo, permiten constatar científicamente incongruencias consolidadas durante años, permitiendo poder darles una explicación y aportar soluciones efectivas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. C, Enciclopedia Broto de las patologías de la construcción, Barcelona: Links Barcelona, S.A, 2006.
- [2] K. Industries, «Cómo prevenir y combatir la humedad en edificios,» [En línea]. Available: <https://knauf-industries.es/como-prevenir-y-combatir-la-humedad-en-edificios/>. [Último acceso: 2024 05 16].
- [3] A. Lozano, G. Lozano y J. J. del Coz,, Curso: Síndrome, patología y terapéutica de las humedades, Gijón: Auto- editor, 2006.
- [4] C. Sanders, Heat, air and moisture transfer in insulated envelope parts: Environmental conditions., Leuven: International Energy Agency., 1996.
- [5] J. J. del Coz, F. P. Rabanal, P. J. García, J. Domínguez , B. Rodríguez y J. M. Pérez, Hygrothermal properties of lightweight concrete: Experiments and numerical fitting study., 2013, pp. Construction and Building Materials, 40:543-555.
- [6] C. G. Bornehag, G. Blomquist, F. Gyntelberg, B. Järvholt, P. Malmberg, . L. Nordvall, A. Nielsen, G. Pershagen y J. Sundell, Dampness in buildings and health, 2001, pp. Indoor Air, 11(2): 72-86.
- [7] W. H. Organization, Environmental burden of disease associated with inadequate housing. Methods for quantifying health impacts of selected housing risks in the WHO European Region, Copenhagen: World Health Organization, 2011.
- [8] Ministerio de Vivienda. Gobierno de España, Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación, Madrid, España, 2006.
- [9] J. M. Pérez-Bella, J. Domínguez-Hernández, B. Rodríguez-Soria, J. J. del Coz-Díaz y E. Cano-Suñén, «Revisión y mejora de la caracterización del grado de impermeabilidad requerido por el CTE DB-HS1 para fachadas de edificación,» Informes de la Construcción, 2015, Vol. 67, 537, e059.
- [10] B. C. J. Blocken, A review of wind-driven rain research in building science, 2004, pp. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 92(13): 1079–1130.
- [11] R. Lacy, Driving-rain maps and the onslaught of rain on buildings, Helsinki, 1965, p. Proceedings of RILEM/CIB symposium on moisture problems in buildings.
- [12] F. Henriques, Quantification of wind-driven rain. An experimental approach. A general review on driven rain and details of an experiment in Portugal to supplement existing research results in Norway, the UK and elsewhere., 1992, pp. Building Research and Information, 20(5): 295-297.

- [13] Asociación Española de Normalización y Certificación, UNE-EN ISO 15927-3
Comportamiento higrotérmico de los edificios – Cálculo y presentación de datos,
Madrid, 2011.
- [14] M. d. A. P. y. A. Gobierno de España, «Sistema de Información Agroclimática para el
Regadío,» [En línea]. Available: <https://eportal.mapa.gob.es/websiar/Inicio.aspx>.
[Último acceso: 11 02 2024].
- [15] Meteored, «Las peculiaridades del clima Balear,» [En línea]. Available:
<https://www.tiempo.com/noticias/divulgacion/las-peculiaridades-del-clima-balear.html>. [Último acceso: 17 05 2024].
- [16] M. d. T. y. M. S. G. d. España, «Instituto Geográfico Nacional,» [En línea]. Available:
<https://www.ign.es/web/ane-datos-geograficos/-/datos-geograficos/datosPoblacion?tipoBusqueda=provincias>. [Último acceso: 12 05 2024].
- [17] G. Maps, «My Maps,» [En línea]. Available:
https://www.google.com/intl/es_ES/maps/about/mymaps/. [Último acceso: 17 05 2024].
- [18] G. d. Navarra, «Meteo Navarra,» [En línea]. Available:
http://meteo.navarra.es/climatologia/zona_sur.cfm. [Último acceso: 17 05 2024].
- [19] F. J. M. Navarro, «El Clima aragonés. Espacios naturales en Aragón,» [En línea].
Available: https://www.naturalezadearagon.com/enclima.php#google_vignette.
[Último acceso: 17 05 2024].
- [20] C. y. viajes, «Guía de climas en el mundo,» [En línea]. Available:
https://www.climasyviajes.com/clima/esp%C3%A1a/castilla-la-mancha#google_vignette. [Último acceso: 17 05 2024].
- [21] E. Gumbel, Statistics of extremes, New York: Columbia University Press., 1958.