



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

CARACTERIZACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A LA
PENETRACIÓN DE AGUA ATMOSFÉRICA EN
FACHADAS MEDIANTE EL USO DE DATOS
CLIMÁTICOS AEMET OpenData.

EXPOSURE CHARACTERISATION TO RAINWATER
PENETRATION ON FAÇADES USING AEMET
OpenData CLIMATE DATA.

Autor/es

Laura Hernández Agustín

Director/es

José María Pérez Bella

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2022

CARACTERIZACIÓN DE LA EXPOSICIÓN A LA PENETRACIÓN DE AGUA ATMOSFÉRICA EN FACHADAS MEDIANTE EL USO DE DATOS CLIMÁTICOS AEMET OpenData.

RESUMEN

La penetración de agua atmosférica en las fachadas de los edificios genera problemas en las construcciones y a los residentes de estos. Con propósito de evitar estos problemas y minimizar el riesgo que conlleva la exposición ambiental, en España se define un grado de impermeabilidad mínimo requerido para las fachadas en el Código Técnico de la Edificación (Documento Básico HS1), a partir de dos parámetros climatológicos. Estos parámetros son la pluviometría media anual y la velocidad básica del viento de cada emplazamiento.

Varios estudios en comunidades autónomas españolas y en otros países han demostrado que es necesaria una caracterización más exhaustiva de la exposición ambiental a la que están sometidas las fachadas para determinar con mayor exactitud y precisión el grado de impermeabilidad requerido en las solicitudes existentes.

En este trabajo se calcularán los índices de exposición escalares y direccionales en cada emplazamiento analizado, a partir de datos climáticos diarios disponibles en formato Json en la base de datos AEMET OpenData. Con estos índices se elaborarán mapas de exposición de las comunidades autónomas de Cataluña, Islas Canarias y Galicia, incorporando información relativa a las orientaciones de solicitación dominantes y se determinarán valores de exposición y de intensidad de precipitación y viento asociados a distintos periodos de retorno. Los resultados se compararán con los establecidos por el Código Técnico de la Edificación (DB-HS1) para los mismos emplazamientos.

Las comparaciones mostrarán la invalidez del método de cálculo propuesto por el CTE, frente a los procedimientos de cálculo aceptados y comprobados internacionalmente para determinar la exposición a la lluvia batiente (Driving Rain Index o daDRI) y la presión eólica simultánea a la lluvia batiente (Driving Rain Wind Pressure o DRWP), ambos parámetros clave para caracterizar el riesgo de penetración de agua de lluvia en fachadas.

Tabla de Contenido

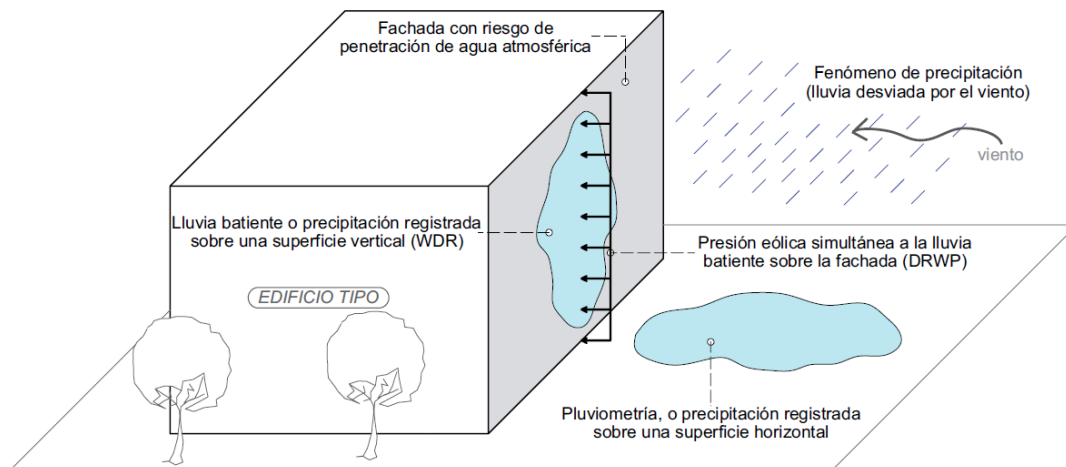
1. Introducción.....	4
2. Objetivo.....	9
3. Alcance	10
3.1 Galicia:	10
3.2 Islas Canarias:	12
3.3 Cataluña:	13
4. Metodología	15
4.1 Formulación aplicada:	15
4.2 Periodos de retorno:	18
4.3 Datos AEMET OpenData:.....	19
4.4 Hoja Resumen:	21
4.5 Mapas de exposición:.....	22
5. Resultados y discusión.....	23
5.1 Fichas resumen:	23
5.2 Mapas:.....	26
5.2.1 Mapas de Galicia:	26
5.2.2 Mapas de Cataluña:.....	29
5.2.3 Mapas de las Islas Canarias:	31
5.3 Relaciones de interés:	33
5.3.1 daDRI-aaDRI:	33
5.3.2 DRWP-aDRWP:	34
5.3.3 Pluviometría media anual-daDRI	35
5.3.4 Velocidad eólica – DRWP:	36
5.3.5 Máx. exposición escalar – Máx. exposición direccional para daDRI y DRWP:	38
5.4 RIWP:	40
5.5 Comparación con el CTE:.....	43
6. Conclusiones	46
7. Bibliografía	48
8. Anexos.....	50

1. Introducción

La acción simultánea de la lluvia y la presión del viento sobre las fachadas de los edificios provoca el humedecimiento de los materiales utilizados en la construcción y la penetración del agua atmosférica hacia el interior de los materiales y los recintos de los edificios [1].

La acción del viento aporta una componente horizontal a la velocidad de caída de las gotas de lluvia, desviando la trayectoria natural de éstas y haciendo de esta forma que impacten en la superficie exterior vertical de los edificios. A este fenómeno se le conoce como lluvia batiente o WDR (Wind-Driven Rain). A su vez, la presión eólica simultánea a la lluvia batiente sobre la fachada, DRWP (Driving Rain Wind Pressure), facilita la penetración del agua a través de los poros y grietas presentes en la fachada del edificio.

La exposición a la acción combinada de WDR y DRWP se considera la causa principal de los problemas relacionados con la penetración del agua en los cerramientos del edificio [2], como son la reducción del rendimiento térmico y el consiguiente aumento de la energía [3], el aumento de los costes de mantenimiento [4], e incluso problemas de salud para los habitantes de los edificios [5]. Por tanto, caracterizar la exposición a ambos parámetros climáticos en cualquier emplazamiento es un objetivo primordial a la hora de diseñar cerramientos de edificios que minimicen estos problemas [6].

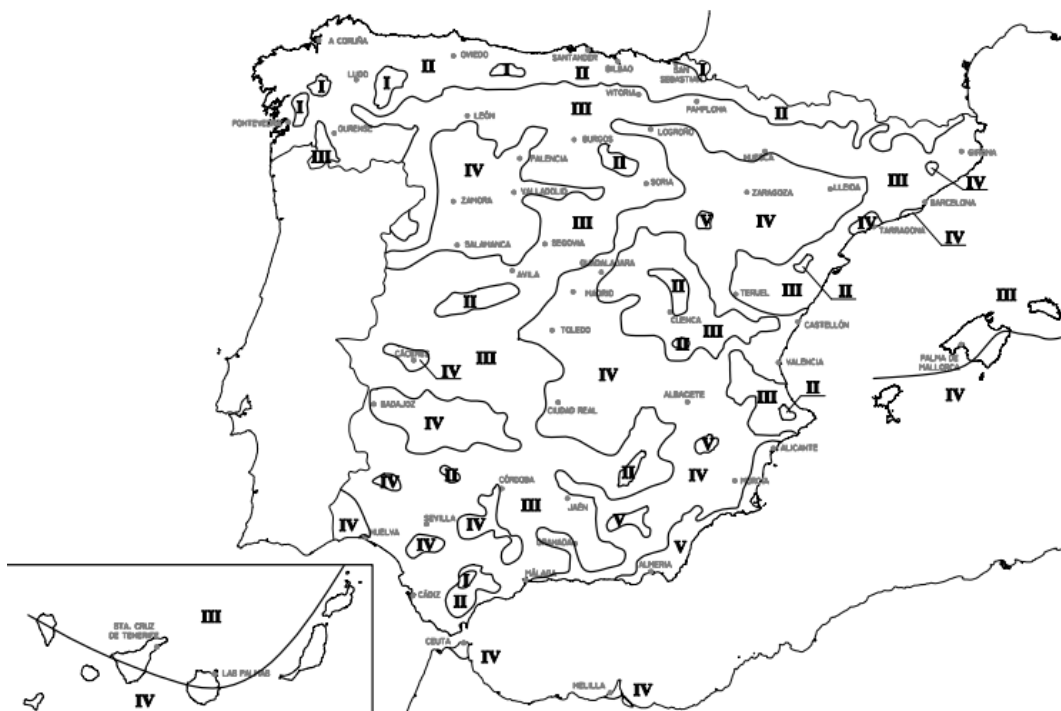


1.1, La lluvia desviada sobre la fachada y la presión eólica simultánea, definen el riesgo de penetración de agua atmosférica en cerramientos verticales [8].

En España, el Código Técnico de la Edificación (CTE) establece, en el Documento Básico de Salubridad – Protección frente a la humedad, DB-HS1, la necesidad de unas condiciones de diseño mínimas que deben cumplir las fachadas para limitar el riesgo de la presencia de humedad en los edificios. Así, es necesario caracterizar y determinar con la mayor exactitud posible la exposición a la penetración de humedad atmosférica en las fachadas, para cumplir con las exigencias básicas del CTE.

El CTE se apoya en los parámetros de velocidad básica del viento y pluviometría media anual para determinar dichas estimaciones. Para identificarlos, se utilizan dos mapas zonales que definen respectivamente estos parámetros en función del emplazamiento. En la figura 1.2 se observa el mapa del CTE en el que se asigna el primer parámetro, la pluviometría media según la región en la que nos encontremos. Se zonifica mediante índices pluviométricos anuales I, II, III, IV y V, correspondiendo a los siguientes valores de pluviometría:

- Zona I cuando $p > 2000$ mm
- Zona II cuando $1000 \text{ mm} < p \leq 2000$ mm
- Zona III cuando $500 \text{ mm} < p \leq 1000$ mm
- Zona IV cuando $300 \text{ mm} < p \leq 500$ mm
- Zona V cuando $p < 300$ mm



1.2, Zonas pluviométricas de promedios en función del índice pluviométrico anual

El segundo de los parámetros es el valor básico de velocidad del viento o valor de la velocidad de viento que puede llegar a mantenerse durante un intervalo de 10 minutos, como máximo, una vez cada 50 años (es decir, con un periodo de retorno de 50 años).

Mediante el mapa 1.3 y la tabla 1.4, se asigna el grado de exposición al viento (V1, V2 o V3) como la combinación de la zona eólica (zonas A, B o C), con la altura del edificio y con la clase de terreno en su entorno (E0 para zonas llanas y despejadas de obstáculos o E1 para zonas urbanas, industriales y forestales).



1.3, Zonas eólicas

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

1.4, Tabla del Grado de exposición al viento

Una vez determinados los dos parámetros (pluviometría media anual y grado de exposición al viento), el grado de impermeabilidad se calcula como la combinación de estos según la tabla 1.5.

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

1.5, Grado de impermeabilidad mínimo exigido a las fachadas

El primer parámetro establecido por el CTE no considera el viento simultáneo a la precipitación, que determina realmente la cantidad de lluvia que es desviada sobre la superficie vertical de la fachada y por tanto, el riesgo de penetración existente. Es decir, con este parámetro no se cuantifica la exposición real de la fachada al agua de lluvia [8].

El segundo parámetro, referido a una velocidad de viento que se espera que se produzca durante un intervalo de 10 minutos para un periodo de retorno de 50 años, tampoco cuantifica la presión eólica simultánea al aporte de agua. Además, en su cálculo se consideran todos los registros de viento, simultáneos o no a la precipitación, lo que distorsiona el resultado obtenido [8].

Adicionalmente, el procedimiento que propone el CTE para determinar el grado de exposición al viento tampoco proporciona un valor cuantitativo, por lo que esta caracterización no permite comparar con exactitud dicho grado para emplazamientos distintos con condiciones de servicio diferentes [7].

Como se comprobará en este trabajo, diversos emplazamientos asignados a zonas pluviométricas o eólicas más favorables presentan exposiciones a la lluvia batiente (índices daDRI) y a la presión eólica simultánea (indicador DRWP) superiores a las de zonas teóricamente más desfavorables y viceversa. Se deduce así que actualmente, el CTE DB-HS1 requiere un grado de impermeabilidad para los diseños de fachadas que no se corresponde exactamente con el riesgo real de penetración de agua en las mismas. Asigna entonces condiciones constructivas insuficientes o excesivas en los emplazamientos para el cumplimiento de la exigencia básica de protección frente a la humedad [8].

Las soluciones constructivas asignadas en el CTE según el grado de impermeabilidad se obtienen a partir de la tabla mostrada en la figura 1.6 a continuación, donde cada letra corresponde a un elemento constructivo distinto de fachada y el número que acompaña a las letras indica el nivel de prestación, un número mayor corresponde a una prestación mejor.

Tabla 2.7 Condiciones de las soluciones de fachada

		Con revestimiento exterior				Sin revestimiento exterior			
Grado de impermeabilidad	≤1	R1+C1 ⁽¹⁾				C1 ⁽¹⁾ +J1+N1			
	≤2								
	≤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			

d. ⁽¹⁾ Cuando la fachada sea de una sola hoja, debe utilizarse C2.

1.6, Condiciones de las soluciones de fachada

En 2009 se normalizó el procedimiento para cuantificar la lluvia batiente recibida por las fachadas mediante el estándar internacional ISO 15927-3. Esta norma se implantó en el ámbito español en 2011, mediante la norma UNE-EN ISO 15927-3. A partir de ella se han llevado a cabo varios estudios dirigidos a cuantificar la exposición a la WDR en algunos lugares de España, aunque en la práctica, la implantación de este estándar en la mayoría de lugares resulta

imposible por el requerimiento de contar con registros horarios de suficiente antigüedad, por lo menos 10 años de datos.

Por este motivo, los estudios internacionales en esta materia han recurrido tradicionalmente a aproximaciones basadas en registros meteorológicos más accesibles, como el índice daDRI que, en vez de registros horarios, hace uso de registros de datos diarios. Varios países han caracterizado así la exposición a la lluvia batiente de sus cerramientos y con ello, realizado una aproximación del riesgo de penetración de agua en los mismos. De manera análoga, en múltiples lugares se ha optado por partir de registros diarios para caracterizar la presión eólica simultánea a la lluvia batiente.

2. Objetivo

El objetivo de este proyecto consiste en caracterizar la exposición de las fachadas a la penetración del agua atmosférica de acuerdo con índices reconocidos y aplicados a nivel internacional, a partir de registros climáticos habitualmente disponibles. Para ello, se realiza el cálculo y la caracterización de la lluvia batiente en diferentes emplazamientos del territorio español, utilizando la nueva base de datos climáticos diarios de AEMET OpenData.

Esta caracterización se lleva a cabo mediante el análisis de datos diarios de intensidad de precipitación, velocidad de viento, dirección de viento y racha de viento, para caracterizar en cada lugar la exposición que sufren las fachadas a la humedad atmosférica. Se determina la cantidad de agua de lluvia que impacta sobre la superficie vertical de las fachadas, índice daDRI, y la presión eólica con la que este aporte de agua es obligado a introducirse en los materiales, índice DRWP. Complementariamente, se calculan valores de precipitación, velocidad de viento y racha de viento asociados a diferentes periodos de retorno.

Una vez realizada esta caracterización, se procederá a elaborar mapas de exposición para las comunidades autónomas españolas analizadas: Cataluña, Islas Canarias y Galicia. Se obtienen así un mapa de exposición daDRI escalar, DRWP escalar, mapa con la orientación de la daDRI direccional más desfavorable y con la orientación del DRWP más desfavorable. Se pretende con ello aportar mapas más detallados y mejor caracterizados que los que actualmente utiliza el CTE para determinar el "grado de impermeabilidad" requerido en fachadas y así también poder comparar los resultados obtenidos con la metodología planteada en este.

También se realizará un análisis de las posibles relaciones que pueden presentar las variables climáticas analizadas durante el trabajo, de forma que se pueda comprobar si realmente las variables utilizadas en el CTE resultan proporcionales a las trabajadas en este proyecto.

Finalmente, se quiere obtener el índice RIWP (Risk Index of Water Penetration o índice de riesgo a la penetración de agua), como resultado comparativo frente al "grado de impermeabilidad" definido con anterioridad en este documento. Con todo ello se pretende aportar una mejor caracterización de la exposición presente en estas comunidades autónomas frente a la penetración de agua en las fachadas y garantizar de este modo mejores soluciones constructivas, adaptadas a las solicitudes ambientales existentes.

3. Alcance

El estudio se realiza en tres comunidades autónomas de España: Galicia, las Islas Canarias y Cataluña.

Se analizan 51 estaciones meteorológicas en total a pesar de que entre las tres comunidades autónomas mencionadas hay un total de 60 existentes, ya que aquellas estaciones con menos tres años de registros de datos se descartan por poder resultar muy poco representativas. Idealmente, el análisis de cada estación se debería llevar a cabo para 10 años de datos, proporcionando así resultados lo más representativos posible. Esta situación no es posible para todas las estaciones analizadas; solo 27 de ellas resultan tener 10 años de datos válidos para análisis. A pesar de ello, la media de años analizados de las 51 estaciones resulta ser 9 años.

Para cada comunidad autónoma se obtienen los datos meteorológicos diarios de las estaciones disponibles en AEMET OpenData. Las variables meteorológicas que se necesitan obtener son:

- Precipitación (mm)
- Dirección del viento (°/10)
- Velocidad media del viento (m/s)
- Racha (m/s)

También es necesario conocer la posición geográfica, latitud, longitud y altura, de cada una de las estaciones analizadas para la realización de los mapas de exposición por comunidad autónoma. Las tres comunidades autónomas analizadas presentan climas muy diferentes entre sí, motivo por el cual también presentan un amplio espectro en los resultados de las variables meteorológicas.

3.1 Galicia:

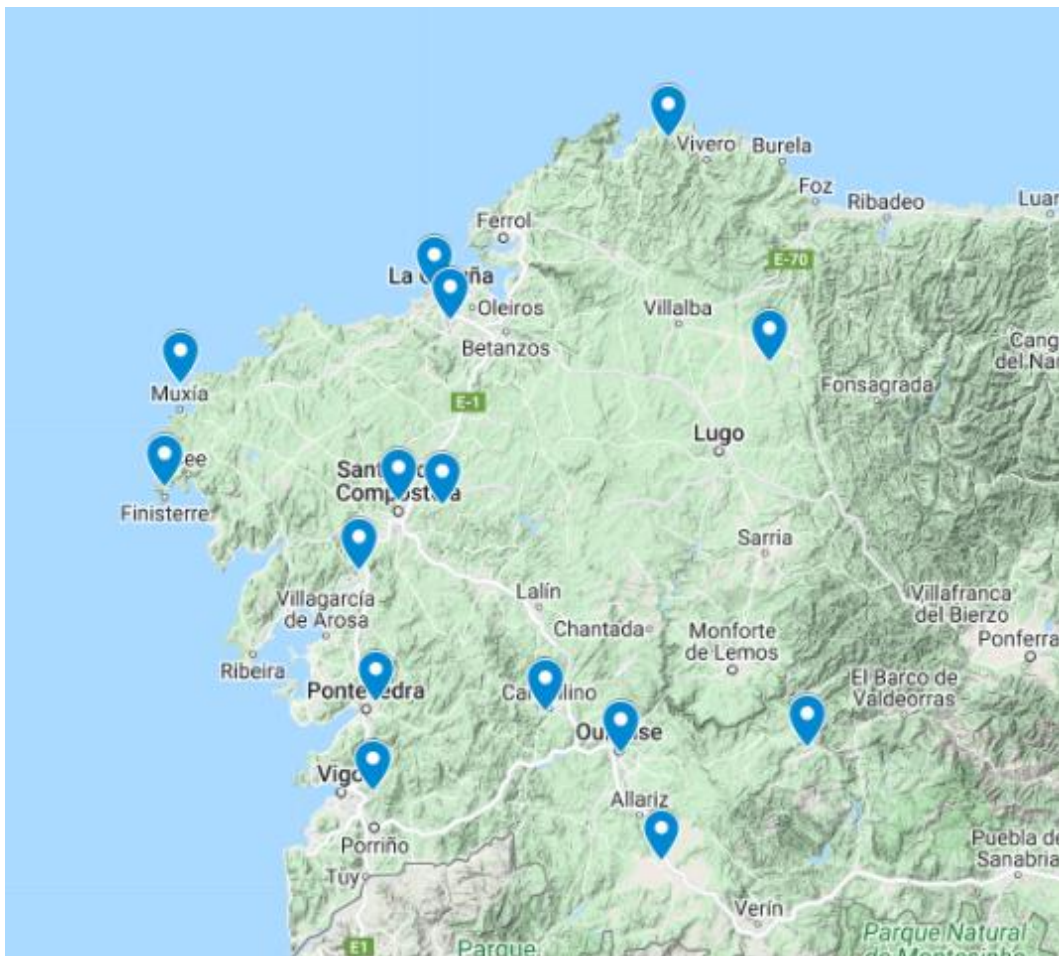
En la comunidad de Galicia las precipitaciones decrecen desde la costa hasta el interior. La provincia de A Coruña es una de las más lluviosas de España, salvo algunas excepciones, en general se recogen más de 1000 mm al año. En algunos sectores de Santiago de Compostela y en los puntos más elevados de Pontevedra se alcanzan valores superiores a los 2000 mm. Los vientos más húmedos se dirigen del suroeste hasta las Rías Baixas. Lo cual resulta en que la zona más lluviosa de Galicia abarque desde Fisterra hasta Vigo, área donde se superan los 1750 mm anuales en ciertos emplazamientos, incluso alguna zona donde se llegan a registrar más de 2500 mm. Sin embargo, al este de la dorsal central de Galicia en Ourense, por ejemplo, no se alcanzan los 1000 mm [11].

En cuanto al régimen de lluvias, en esta comunidad se registra un máximo importante en invierno y un mínimo bastante acusado en verano, lo que da lugar a algunos meses secos. En la costa, generalmente, solo se da un mes seco.

Del total de 18 estaciones climatológicas disponibles en Galicia mediante Aemet Open Data, se han podido analizar y considerar válidas dentro del estudio 15. Las estaciones analizadas por provincias son:

- A Coruña: A Coruña, A Coruña Aeropuerto, Cabo Vilán, Estaca de Bares, Fisterra, Padrón, Santiago de Compostela y Santiago de Compostela Aeropuerto.
- Lugo: Lugo Aeropuerto.
- Ourense: A Pobra de Trives, O Carballiño, Ourense y Xinzo de Limia.
- Pontevedra: Pontevedra y Vigo Aeropuerto.

La distribución geográfica de las estaciones es la mostrada en la figura 3.3.



3.1, Estaciones meteorológicas analizadas en Galicia.

La comunidad autónoma de Galicia cuenta con una extensión de 29575 km², por lo que, habiendo analizado 15 estaciones, a cada estación le correspondería un área de cobertura de 1971,66 km². Aunque observando la figura 3.1 se puede ver cómo la distribución de estaciones no es del todo uniforme, principalmente en el área comprendida entre las cuatro capitales de provincia hay carencia de estaciones. Sería necesaria una estación al menos en esta zona para

que en el área total de la comunidad las estaciones analizadas estuviesen más homogéneamente distribuidas.

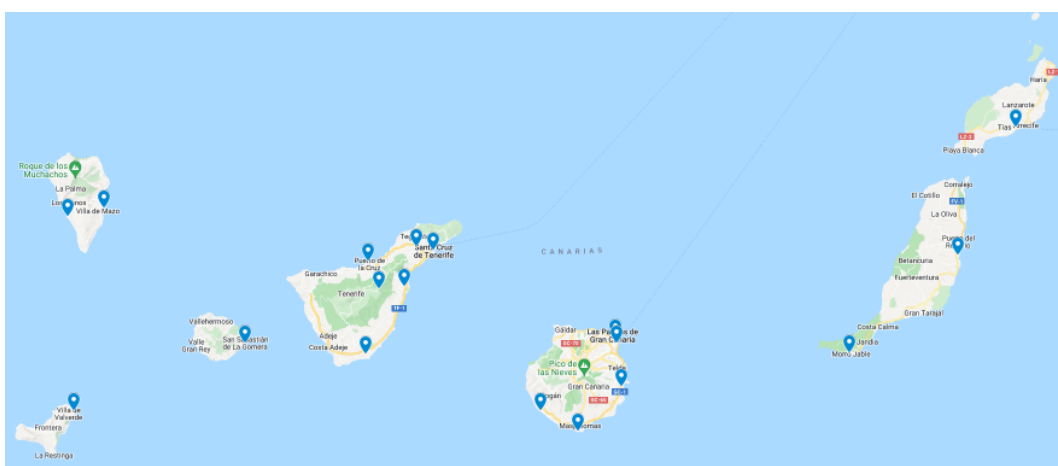
3.2 Islas Canarias:

Las Islas Canarias presentan condiciones climáticas diferentes dependiendo de la isla en la que nos encontremos, por lo que es complicado definir un clima concreto para esta comunidad autónoma. Por este motivo es más adecuado referirse a los microclimas de cada isla. En las zonas bajas predomina el Anticiclón de las Azores, lo que resulta en precipitaciones escasas (menos de 300 mm) e irregulares. Las precipitaciones pueden llegar a los 1000 mm en las zonas de medianías para las vertientes de barlovento, mientras que en las de sotavento se reduce la pluviometría al desaparecer el mar de nubes. En las zonas más altas de cumbres, las precipitaciones son del orden de 400 mm [12].

De las 20 estaciones localizadas en las Islas Canarias, se analizan 18 de ellas. Las estaciones analizadas por provincias son:

- Las Palmas: Fuerteventura Aeropuerto, Gran Canaria Aeropuerto, Lanzarote Aeropuerto, Las Palmas de Gran Canaria-Plaza de la Feria, Las palmas de Gran Canaria-San Cristóbal, Maspalomas, Mogán-Puerto y Pájara.
- Santa Cruz de Tenerife: Güímar, Hierro Aeropuerto, Izaña, San Sebastián de la Gomera, La Palma Aeropuerto, Puerto de la Cruz, Santa Cruz de Tenerife, Tazacorte, Tenerife Norte Aeropuerto y Tenerife Sur Aeropuerto.

Se puede observar la distribución geográfica de las estaciones analizadas en la figura 3.2 a continuación.



3.2, Estaciones meteorológicas analizadas en Islas Canarias

Con un área total de la comunidad de 7447 km², analizando 18 estaciones se tiene que cada estación tendría una cobertura de 413,72 km². Las estaciones están concentradas en las islas de

Tenerife y Gran Canaria, para una distribución más uniforme de las estaciones se necesitaría al menos una estación más en la zona céntrica de la isla de Fuerteventura.

3.3 Cataluña:

El clima en Cataluña presenta generalmente pocas precipitaciones, excepto en las zonas montañosas cercanas a los Pirineos que reciben un régimen de precipitaciones muy elevado. Por otro lado, Cataluña cuenta con gran diversidad geográfica y con ello variedad de climas que provoca un extenso baremo de medias anuales precipitaciones (entre los 400 mm de la Depresión Central y los 1200 mm de algunos puntos del Pirineo). Estos climas se pueden clasificar como modalidades del clima mediterráneo, que en esta comunidad se da en cuatro formas:

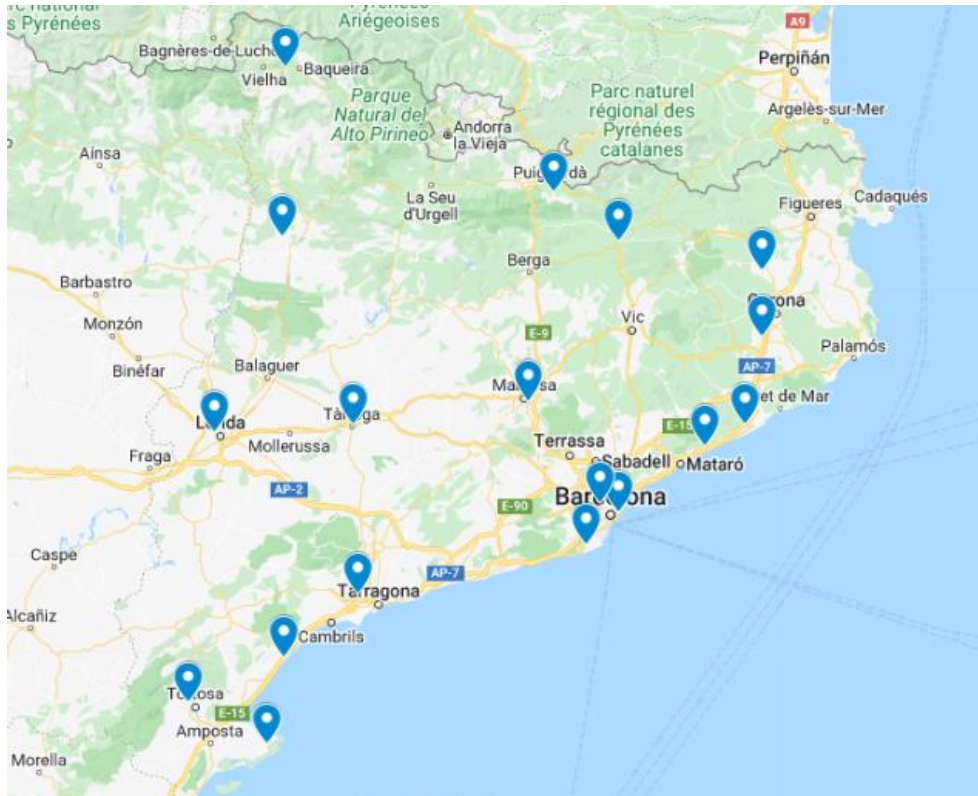
- Montaña alta: en el Prepirineo, la Cordillera Transversal y el Montseny, menos lluviosa que la subalpina y con un breve período seco.
- Montaña media y baja: en la Cordillera Prelitoral, menos pluviosidad.
- Litoral: en las llanuras costeras, la Depresión Prelitoral y la Cordillera Litoral, con veranos muy secos y otoños húmedos.
- Continental: Depresión Central, medio año con sequías.

No obstante, hay dos áreas que escapan al tiempo mediterráneo. Son el Valle de Arán, muy lluvioso y el Alto Pirineo que también presenta alta pluviosidad [13].

En el caso de Cataluña, de un total de 22 estaciones disponibles, se han analizado 18. Las estaciones analizadas por provincias son:

- Barcelona: Barcelona aeropuerto, Arenys de mar, Barcelona, Barcelona-Fabra, Manresa y Santa Susanna.
- Gerona: Girona Aeropuerto, La Molina, Porqueres y Ripoll.
- Lérida: Lleida, Naut Aran-Arties, Talarn y Tárrega.
- Tarragona: Reus Aeropuerto, Sant Jaume d'Enveja, Estación de Tortosa (Roquetes) y Vandellòs.

Estas estaciones se muestran localizadas en la siguiente figura 3.3:



3.3, Estaciones meteorológicas analizadas en Cataluña

Cataluña cuenta con una superficie total de 32107 km², correspondiendo 1783,72 km² de cobertura a cada una de las 18 estaciones analizadas. Similar al caso de Galicia, las estaciones no muestran una distribución del todo uniforme en la zona interior de la comunidad, entre Balaguer, La Seu d'Urgell y Berga en concreto. Se puede observar mayor concentración de estaciones a lo largo de la costa.

4. Metodología

4.1 Formulación aplicada:

El primer paso para analizar los datos de cada estación meteorológica es preparar una hoja de cálculo Excel para analizar los registros de datos diarios disponibles en AEMET OpenData de cada estación.

En esta hoja se introduce la formulación para calcular todos los índices necesarios. La hoja también muestra un análisis de la disponibilidad de datos en total, por año y por mes de cada año, que permiten hacer una selección de qué años y estaciones son adecuadas para analizar. Finalmente, se ha elaborado en la propia hoja Excel una ficha resumen de la estación con los datos más representativos del análisis de los datos de la estación.

Empezando por la formulación que hay que introducir para realizar el análisis necesario, se ha utilizado la relación daDRI (m^2/s), índice de lluvia batiente medio anual, basado en datos diarios (annual Driving Rain Index from daily data). Primero se realiza un análisis escalar del índice cada día, $daDRI_{escalar}$ (m^2/s), utilizando la fórmula 4.1:

$$daDRI_{escalar,i} = U_i \times \frac{R_{h,i}}{1000}$$

4.1

Donde:

U (m/s): La velocidad del viento registrada para ese día.

R_h (mm): La precipitación registrada para ese día.

Con el sumatorio de los "i" valores $daDRI_{escalar}$ diarios obtenidos, se calcula el índice daDRI en promedio anual como se muestra en la fórmula 4.2:

$$daDRI = \frac{\sum_{i=1}^N U_i \times \frac{R_{h,i}}{1000}}{N}$$

4.2

Donde:

N: Número de años analizados para esa estación.

También se calcula el índice aaDRI (m^2/s), índice de lluvia batiente en promedio anual basado en datos anuales de lluvia y viento (annual Driving Rain Index from annual data). Primero se calcula este valor para cada año mediante la fórmula:

$$aaDRI_{escalar,i} = U_i \times \frac{R_{h,i}}{1000}$$

4.3

Donde:

U (m/s): La velocidad media del viento de ese año.

R_h (mm): La precipitación total de ese año.

Y una vez obtenidos los datos anuales, se hace el promedio para los años de datos analizados como se muestra en la fórmula 4.4:

$$aaDRI = \frac{\sum_{i=1}^N U_i \times \frac{R_{h,i}}{1000}}{N}$$

4.4

Donde:

N: Número de años analizados para esa estación.

Por otro lado, se calcula el índice DRWP (Pa), presión eólica simultánea a la lluvia batiente sobre la fachada, primero en valores diarios (se puede expresar también como dDRWP). Por su propia definición, los datos de velocidad del viento que no llevaban asociados registros de lluvia de forma simultánea han sido descartados. Con estos datos diarios se hace el promedio de todos ellos, mediante la formulación 4.5:

$$DRWP = \frac{\sum_{i=1}^m C_p \times \frac{1}{2} \times \rho_{air} \times U_i^2}{m}$$

4.5

Donde:

C_p: Coeficiente de presión de valor 1.

ρ_{air} (kg/m³): Densidad del aire, asumiendo valor 1,2.

U (m/s): Velocidad del viento en un momento de la precipitación.

m: número de días con datos de velocidad del viento y precipitación simultánea.

También se calcula el índice aDRWP (Pa), presión eólica media simultánea a la lluvia batiente sobre la fachada obtenida a partir de datos anuales, con la fórmula 4.6:

$$aDRWP = \frac{\sum_{i=1}^N C_p \times \frac{1}{2} \times \rho_{air} \times U_i^2}{N}$$

4.6

Donde:

U (m/s): Velocidad media anual del viento, previamente calculada para cada año.

N: número de años analizados.

También se realiza el análisis direccional de los índices daDRI y DRWP, que se va a describir a continuación. Este cálculo direccional es necesario realizarlo, de nuevo, en cada estación para cada día del intervalo de datos analizado y para cada posible orientación de fachada (discretizada en intervalos de 15°), obteniendo los valores direccionales para 24 orientaciones de fachada.

El cálculo direccional va a permitir conocer cuáles son las direcciones más expuestas de fachada y por tanto las más desfavorables, así como las más protegidas. Adicionalmente, permite establecer una correlación entre los valores direccionales más desfavorable y la caracterización direccional.

Empezando con el cálculo del índice daDRI direccional (m²/s), la lluvia batiente media anual que impacta sobre una fachada con orientación Θ (°) se calcula como:

$$daDRI_{\Theta^{\circ}} = \frac{\sum_{i=1}^N U_i \times \frac{R_{h,i}}{1000} \times \cos(D_i - \Theta)}{N}$$

4.7

Donde:

U (m/s): La velocidad del viento registrada para ese día.

R_h (mm): La precipitación registrada para ese día.

N: Número de años analizados para esa estación.

D (°): Dirección del viento registrada para ese día.

Θ (°): Orientación de fachada, discretizada en intervalos de 15°.

Por último, el índice DRWP (Pa) direccional, valor medio de presión eólica simultánea a la lluvia batiente sobre una fachada de orientación Θ (°), puede obtenerse mediante la ecuación:

$$DRWP_{\Theta^{\circ}} = \frac{\sum_{i=1}^N C_p \times \frac{1}{2} \times \rho_{air} \times U_i^2 \times \cos(D_i - \Theta)}{N}$$

4.8

Donde:

C_p: Coeficiente de presión de valor 1.

ρ_{air} : Densidad del aire, asumiendo valor 1,2 (kg/m³).

U (m/s): La velocidad del viento en un momento de la precipitación.

N: Número de años analizados para esa estación.

D: Dirección del viento (°).

Θ: Orientación de fachada (°), discretizada en intervalos de 15°.

De nuevo, por definición del índice DRWP, los datos de velocidad del viento que no llevaban asociados registros de lluvia de forma simultánea han sido descartados para el cálculo direccional también.

4.2 Periodos de retorno:

En la hoja Excel también se realiza la estimación de variables meteorológicas asociadas a períodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100, 250 y 500 años, resultados que se incluirán también en la hoja resumen de cada estación. Las variables meteorológicas analizadas en este sentido han sido:

- Precipitación máxima en 24 horas (mm).
- Máxima velocidad media diaria de viento (m/s).
- Máxima racha de viento (m/s).

Los periodos de retorno se usan para dar una estimación de la probabilidad de ocurrencia de un evento determinado en un periodo determinado. Por ejemplo, el periodo de retorno para una determinada precipitación máxima diaria es el número de años en que se considera se superará una vez, como promedio, dicho valor de precipitación máxima diaria. Partiendo de este concepto, en este contexto se calcula cuáles serán los valores de la variable meteorológica que se desee conocer para los periodos de retorno preestablecidos.

Para ello, se utiliza la formulación de Gumbel, encuadrada en la denominada Teoría de Valores Extremos, y que se basa en las series históricas de máximos de los datos disponibles para cada una de las estaciones. Primero, la hoja Excel proporciona los valores máximos de las variables meteorológicas por cada año y con ellos se calculan los parámetros necesarios para la posterior resolución de la fórmula de Gumbel. Estos parámetros necesarios son:

- Media de los máximos o promedio: $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N}$; N: número de años
- Desviación estándar: $\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N}}$
- Media de la variable reducida: $\mu_y = \frac{\sum_{i=1}^N \left(-\ln \left(\ln \left(\frac{N+1}{i} \right) \right) \right)}{N}$; Sabiendo que para N=10 años, $\mu_y = 0,495206553$.

- Desviación estándar: $\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum(y_i - \bar{y})^2}{N}}$; $y = -\ln \cdot \left(\ln \left(\frac{N+1}{i} \right) \right)$; Sabiendo que para N=10 años $\sigma_y = 0,949625172$.
- Moda de la distribución: $\mu = \bar{x} - \mu_y \frac{\sigma_x}{\sigma_y}$
- Dispersión de la distribución: $\beta = \frac{\sigma_x}{\sigma_y}$

La probabilidad de que un valor de magnitud igual o superior a “x” se repita en un determinado periodo de años, se puede expresar mediante la siguiente formulación de Gumbel:

$$PR = \frac{1}{1 - e^{-e^{-\frac{\mu-x}{\beta}}}}$$

4.9

Siendo:

PR: Es el periodo de retorno esperado en años.

x: Variable de estudio.

β : Dispersión de la distribución

μ : Moda de la distribución

Si se despeja el valor de la variable “x” de la ecuación anterior, se tendrá la fórmula a utilizar para calcular los valores de las variables de estudio que se darán de media 1 vez cada “PR” años:

$$x = \mu - \beta \cdot \left(\ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{PR} \right) \right) \right)$$

4.10

4.3 Datos AEMET OpenData:

Los datos a analizar se obtienen de la base pública de datos meteorológicos de AEMET OpenData, el cual es un servicio que provee fundamentalmente datos meteorológicos y climatológicos elaborados por AEMET [14].

El proceso para obtener datos meteorológicos de la web de AEMET empieza por dirigirse a la sección “Acceso general” de la web de AEMET, donde se puede solicitar la descarga de registros climáticos para un periodo de tiempo concreto. Cabe destacar que la descarga de datos se tiene que hacer estación por estación. Adicionalmente, es necesario solicitar una “API Key” que se debe introducir siempre que se realice una solicitud de descarga de datos.

Una vez solicitada la descarga, la web proporciona en una ventana emergente una dirección URL donde se genera la base de registros meteorológicos que se desea obtener en formato JSON. Este formato hay que convertirlo mediante otra dirección web a formato XML, apto para introducir los registros de datos en la hoja de cálculo Excel previamente mencionada que se necesita para poder tratarlos y analizarlos correctamente.

Se decide descargar todos los datos diarios disponibles de cada estación desde el 1 de Enero de 2012 hasta el 31 de Diciembre de 2021 (periodo de 10 años) [15]. Algunas estaciones no disponen de datos suficientes en el momento de la descarga como para tenerlas en consideración. En este punto, se ha considerado un valor mínimo de 3 años de datos completos disponibles para descarga, para el análisis de la estación.

Una vez obtenidos los datos, éstos se introducen en la hoja Excel donde se pueden ver análisis detallados del porcentaje de datos disponibles. Puede haber estaciones en las que haya días sin ningún registro o días en los que falte el dato de precipitación y/o dirección y/o velocidad media. Para determinar la relevancia de este suceso en el conjunto de datos, recurrimos a los análisis presentados a continuación, que incluyen el porcentaje de datos disponibles por año, por mes de cada año y el porcentaje total disponible, como se muestra en la figura 4.1.

En esta figura 4.1 se puede observar un extracto de la tabla del análisis mensual, anual y total de los datos disponibles para la estación de La Palma Aeropuerto perteneciente a las Islas Canarias para los años 2019, 2020 y 2021 (se omiten en la imagen los años 2012 a 2018) de la hoja Excel. Se puede ver como para los tres años de este ejemplo concreto se tiene un porcentaje de datos disponibles mayor al 95%, y para el total de 10 años analizados en esta estación se tiene un porcentaje total de datos de 96,52%.

		2019				2020				2021				
		Días Reales	Días con Datos	Días sin Datos	% Datos	Días Reales	Días con Datos	Días sin Datos	% Datos	Días Reales	Días con Datos	Días sin Datos	% Datos	
_01	Ene	31	31	0	100%	31	31	0	100%	31	31	0	100%	97,74%
_02	Feb	28	28	0	100%	29	29	1	97%	28	28	1	96%	97,87%
_03	Mar	31	31	0	100%	31	31	0	100%	31	31	0	100%	98,39%
_04	Abr	30	30	1	97%	30	30	0	100%	30	30	0	100%	99,00%
_05	May	31	31	1	97%	31	31	2	94%	31	31	1	97%	97,42%
_06	Jun	30	30	2	93%	30	30	0	100%	30	30	0	100%	98,33%
_07	Jul	31	31	1	97%	31	31	0	100%	31	31	0	100%	98,71%
_08	Ago	31	31	0	100%	31	31	3	90%	31	31	0	100%	98,06%
_09	Sep	30	30	0	100%	30	30	1	97%	30	30	1	97%	89,33%
_10	Oct	31	31	0	100%	31	31	1	97%	31	31	0	100%	86,77%
_11	Nov	30	30	2	93%	30	30	1	97%	30	30	1	97%	97,33%
_12	Dic	31	31	0	100%	31	31	0	100%	31	31	0	100%	99,35%
Días por año		365				366				365				3653
Total		365				366				365				3653
Total sin datos		7				9				4				127
% Datos		98,08%				97,54%				98,90%				96,52%

4.1, Extracto del análisis anual de datos disponibles para La Palma Aeropuerto.

En caso de que el porcentaje de datos disponible en un año sea mayor a 80%, se considera ese año válido para el análisis. Si en un año el porcentaje está por debajo de 80% pero es mayor a 50% y además los datos están distribuidos equitativamente en los diferentes meses del año (por ejemplo, no faltan todos los meses de verano o primavera), este se considera también como válido. En caso contrario y para porcentajes de datos disponibles en el año por debajo de 50%, se descarta el año del análisis de la estación y se eliminan los datos de registros correspondientes de la hoja Excel, por considerarse un insuficiente número de registros o estar estos concentrados en meses especialmente secos o lluviosos.

Por estos motivos, no todas las estaciones tienen 10 años de datos analizados. De 51 estaciones analizadas son 27 las que cuentan con 10 años de datos válidos, y como mínimo se ha considerado la estación válida si contaba con 3 años de datos suficientes.

4.4 Hoja Resumen:

Una vez analizadas todas las estaciones de cada provincia de las comunidades objeto de estudio y previamente a la realización de los mapas de exposición, se procede a realizar una hoja resumen. Este documento consiste en una hoja Excel que recopila los datos más relevantes y necesarios de cada estación para la elaboración de los mapas de exposición. Los datos recopilados incluyen:

- Latitud (dd), Longitud (dd), Altitud (m), UTM X, UTM Y y Huso.
- daDRI, aaDRI, DRWP, aDRWP, Máxima daDRI direccional y Máxima DRWP direccional.
- Porcentaje datos válidos, Años disponibles, Porcentaje de años sin datos, Días con WDR, mm medios, m/s medios, Racha media (m/s) y m/s simultáneos a lluvia.
- Orientación de la daDRI direccional máxima, Orientación de la dDRWP direccional máxima, Precipitación máxima diaria (24 h), Viento máximo (datos diarios) e Intensidad máxima de racha.

Adicionalmente, en esta hoja resumen se calculan el índice daDRI normalizado (4.11) y el índice dDRWP normalizado (4.12), necesarios para el cálculo del índice RIWP.

$$daDRI_{normalizado} = \frac{daDRI_i - daDRI_{mínimo}}{daDRI_{máximo} - daDRI_{mínimo}} \quad 4.11$$

$$dDRWP_{normalizado} = \frac{DRWP_i - DRWP_{mínimo}}{DRWP_{máximo} - DRWP_{mínimo}} \quad 4.12$$

El índice RIWP (Risk Index of Water Penetration) es un indicador conjunto que expresa la combinación de daDRI y dDRWP en cada estación, lo que permite conocer qué emplazamientos resultan más desfavorables en conjunto tanto por el agua recibida (daDRI), como por la presión con la que ésta es forzada a introducirse en los materiales (dDRWP). El índice RIWP se obtiene como:

$$RIWP = \sqrt{daDRI^2 + dDRWP^2}$$

4.13

El contrapunto de este indicador es que depende de la base muestral que se ha tomado. Así, a mayor base muestral, más representativo es el RIWP asociado a cada estación ya que usa los valores máximo y mínimo de la base muestral, al ser la combinación de daDRI y dDRWP normalizados.

4.5 Mapas de exposición:

Una vez realizados todos los cálculos necesarios, ya se pueden realizar los mapas de exposición para cada comunidad autónoma. La forma de proceder con la realización de los mapas es, mediante el programa Allplan 2020 de la empresa alemana Nemetscheck, haciendo un levantamiento de terreno donde tenemos las coordenadas "X" - UTM X e "Y" - UTM Y, y la "Z", en lugar de ser altura topográfica, es el valor de exposición que corresponda según el mapa (daDRI o DRWP).

Una vez modelado el terreno, se dibujan curvas de nivel que en este caso son isolíneas de exposición. Para mejorar el afinado de los puntos en el perímetro de las comunidades, se utilizan también los puntos que ya existían de comunidades limítrofes (Castilla y León, Asturias y Aragón) en trabajos previos. Se obtienen por comunidad autónoma:

- Mapa de daDRI escalar.
- Mapa de dDRWP escalar.
- Mapa con la orientación de la daDRI direccional más desfavorable.
- Mapa con la orientación de la dDRWP direccional más desfavorable.

5. Resultados y discusión

5.1 Fichas resumen:

Para cada comunidad autónoma se ha llevado a cabo un análisis mediante Excel en todas las estaciones con registros de datos disponibles suficientes, plasmando los resultados necesarios y más relevantes para la posterior caracterización de la comunidad autónoma en una hoja resumen que consta de dos partes (1/2 y 2/2).

Como se puede observar en la figura 5.1 a continuación, tomando como ejemplo la estación La Palma Aeropuerto, en la primera parte (1/2) de la hoja resumen encontramos:

- Provincia a la que pertenece la estación: Sta. Cruz de Tenerife.
- Datos identificativos de la estación, como su nombre: LA PALMA AEROPUERTO y el indicativo: C139E.
- Coordenadas en unidades decimales (Latitud, Longitud y Altitud) y en unidades UTM (UTM X, UTM Y y Huso)
- Pluviometría media anual (mm/año), calculada como el promedio de los datos diarios de precipitación registrados en la estación para los años analizados.
- Velocidad media del viento (m/s), promedio de todos los datos diarios de velocidad del viento registrados.
- Presión eólica media (Pa), calculada como $P_a = \frac{1,2 \times (\text{velocidad media del viento})^2}{2}$
- Velocidad media racha de viento (m/s), promedio de todos los datos diarios de racha de viento registrados.
- Velocidad del viento simultáneo a la lluvia (m/s), promedio de los datos de velocidad del viento para los eventos con precipitación simultánea.
- Años analizados: 10 años y porcentaje total de datos diarios válidos en esos años: 96,5%.
- Días anuales con lluvia batiente, que es el promedio de todos los días en los que hay registrados datos de velocidad de viento y precipitación (distinta de 0) de forma simultánea, para los años analizados.

STA. CRUZ DE TENERIFE

ESTACIÓN (1/2):

LA PALMA AEROPUERTO

DATOS ESTACIÓN C139E (Indicativo)

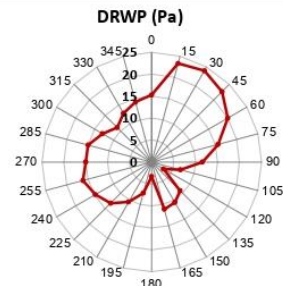
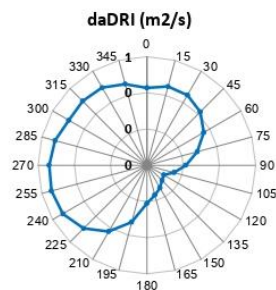
ALTITUD (m)		33		
LATITUD	LONGITUD	X (LONG.)	Y (LAT.)	Huso
28,3759	-17,4518	259723,838	3141332,607	28
PLUVIOMETRÍA MEDIA ANUAL (mm)		226		
VEL. MEDIA DEL VIENTO (m/s)		5,26		
PRESIÓN EÓLICA MEDIA (Pa)		16,60		
VEL. MEDIA RACHA DE VIENTO (m/s)		11,47		
VEL. VIENTO SIMULTÁNEO A LLUVIA (m/s)		5,67		
AÑOS ANALIZADOS (2012-2021)		10		
% DE REGISTROS DIARIOS VÁLIDOS		96,5		
DÍAS ANUALES CON LLUVIA BATIENTE		70		



EXPOSICIÓN A LA PENETRACIÓN DE AGUA ATMOSFÉRICA (VALOR ESCALAR)

DRIVING RAIN INDEX daDRI (m2/s)	1,162	DRIVING RAIN WIND PRESSURE dDRWP (Pa)	22,709
DRIVING RAIN INDEX aaDRI (m2/s)	1,190	DRIVING RAIN WIND PRESSURE aDRWP (Pa)	16,636

DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL DE LA EXPOSICIÓN (EXPOSICIÓN POR ORIENTACIÓN DE FACHADA)



Máx. valor direccional daDRI (m2/s)	0,546
Orientación de la mayor exposición	255º
Min. valor direccional daDRI (m2/s)	0,108
Orientación de la menor exposición	120º

Máx. valor direccional DRWP (Pa)	23,999
Orientación de la mayor exposición	30º
Min. valor direccional DRWP (Pa)	3,099
Orientación de la menor exposición	120º

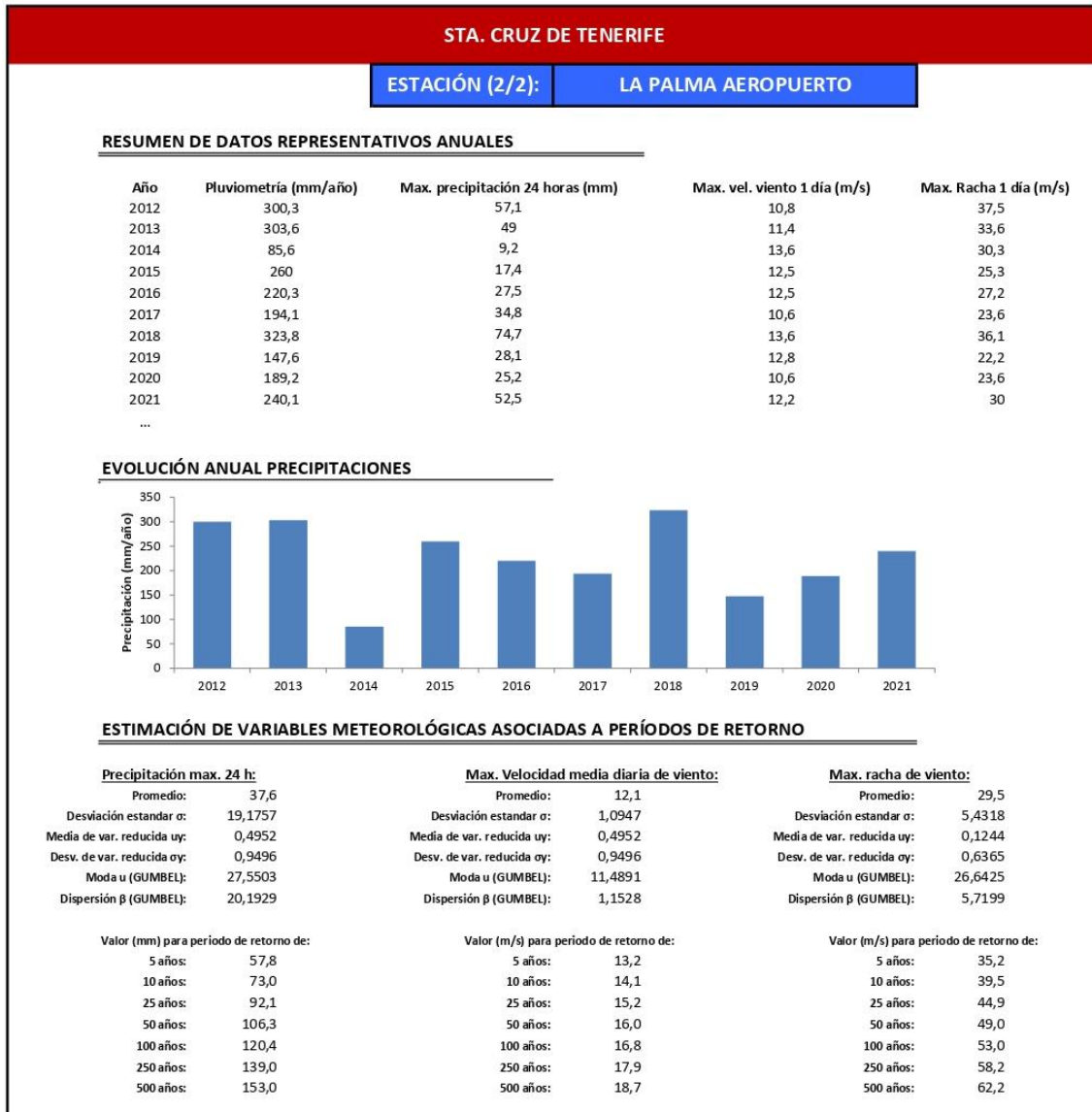
5.1, Ficha resumen (1/2)

- Índice de lluvia batiente en promedio diario (m²/s), daDRI, y anual, aaDRI.
- Presión eólica simultánea al aporte de agua en promedio diario (Pa), dDRWP y anual, aDRWP.
- Gráfico de distribución de los valores daDRI para cada dirección, máximo y mínimo valor de daDRI direccional junto con las direcciones a las que se dan estos valores máximo y mínimo.
- Gráfico de distribución de los valores dDRWP para cada dirección, máximo y mínimo valor de dDRWP direccional junto con las direcciones a las que se dan estos valores máximo y mínimo.

La segunda parte de la ficha resumen consta de:

- Resumen de los datos representativos por años de pluviometría total registrada, máxima precipitación, máxima velocidad del viento y máxima racha.

- Gráfica de evolución por años de las precipitaciones, corresponde a los valores de pluviometría total de cada año representados en la parte superior.
- Variables de distribución necesarias (Promedio, Desviación estándar, Media de variable reducida, Desviación de variable reducida, Moda y Dispersión de Gumbel) para el cálculo de los valores asociados a periodos de retorno (5, 10, 25, 50, 100, 250 y 500 años) de máxima precipitación, máxima velocidad del viento y máxima racha.



5.2, Ficha resumen (2/2)

5.2 Mapas:

A partir de los cálculos realizados con datos recopilados en todas las estaciones, es posible elaborar mapas de isolíneas que representan la exposición daDRI escalar, máximo valor daDRI direccional, DRWP escalar y máximo valor DRWP direccional en cada comunidad autónoma.

Para ello, se ha utilizado el programa Allplan 2020 de la empresa Nemetscheck, emulando un levantamiento topográfico convencional: mientras las coordenadas “x” e “y” representan el posicionamiento de cada estación, la variable “z” representa el valor de exposición a representar. Derivándose de estos valores las correspondientes líneas de nivel (isolíneas de exposición en nuestro caso).

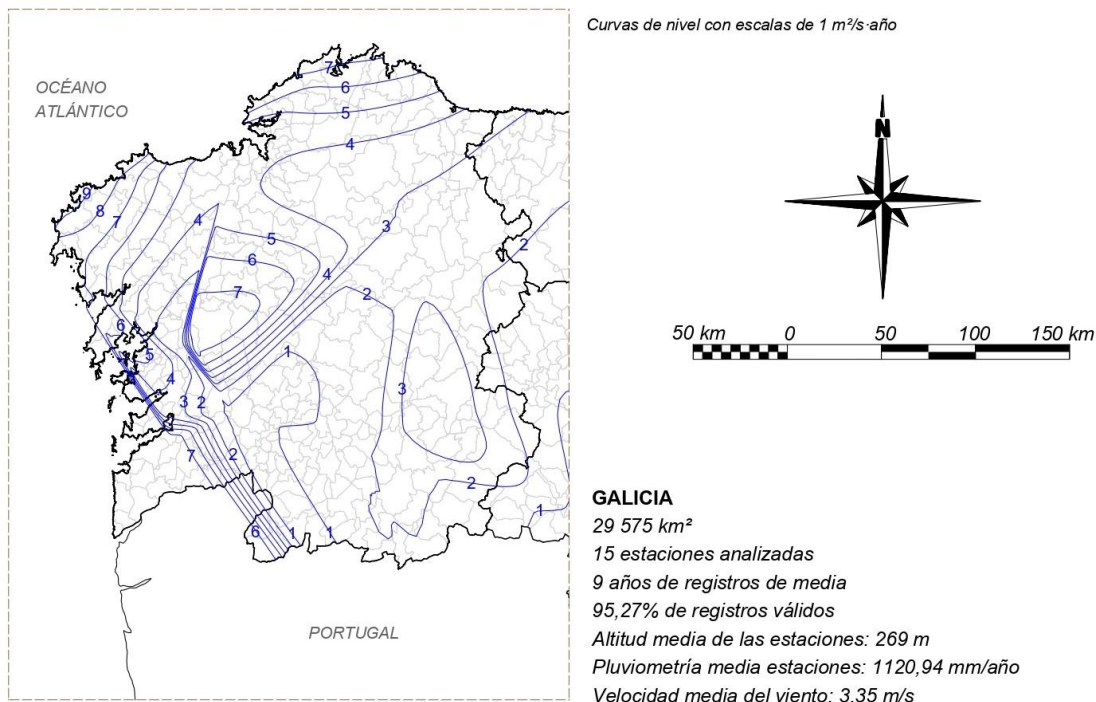
Además, en la caracterización de los mapas se ha hecho uso de resultados obtenidos en estudios de las comunidades colindantes. Han sido facilitados por el director en base a trabajos previos realizados en esas comunidades. Es de destacar la importancia e influencia de la calidad de los datos a analizar y el tratamiento que se les aplica para la validez y fiabilidad de los resultados obtenidos.

5.2.1 Mapas de Galicia:

En primer lugar, en la figura 5.3 se presenta el mapa de “Exposición media anual a la lluvia batiente, índice daDRI.” para la comunidad de Galicia. En este mapa se plasman los resultados de los índices daDRI escalares obtenidos para cada emplazamiento, de forma que proporcionan curvas de exposición para dicho índice.

Se representan las curvas de nivel con escalas de $1 \text{ m}^2/\text{s}$ por año, en esta comunidad se encuentran hasta 9 niveles de isolíneas del índice daDRI distintos repartidos por el territorio. Las zonas de los diferentes niveles se reparten de forma compleja, con menores valores en las regiones interiores más alejadas de la costa y mayores valores en las zonas más cercanas a la vertiente Atlántica al ser las más expuestas a la influencia del clima oceánico.

La provincia de Pontevedra junto con la zona Sur de la provincia de A Coruña y la zona Este de la provincia de Ourense son las que presentan mayores valores de exposición, lo cual es lógico dada la incidencia de fuertes vientos atlánticos que acompañan a los fenómenos de precipitación en toda la zona.

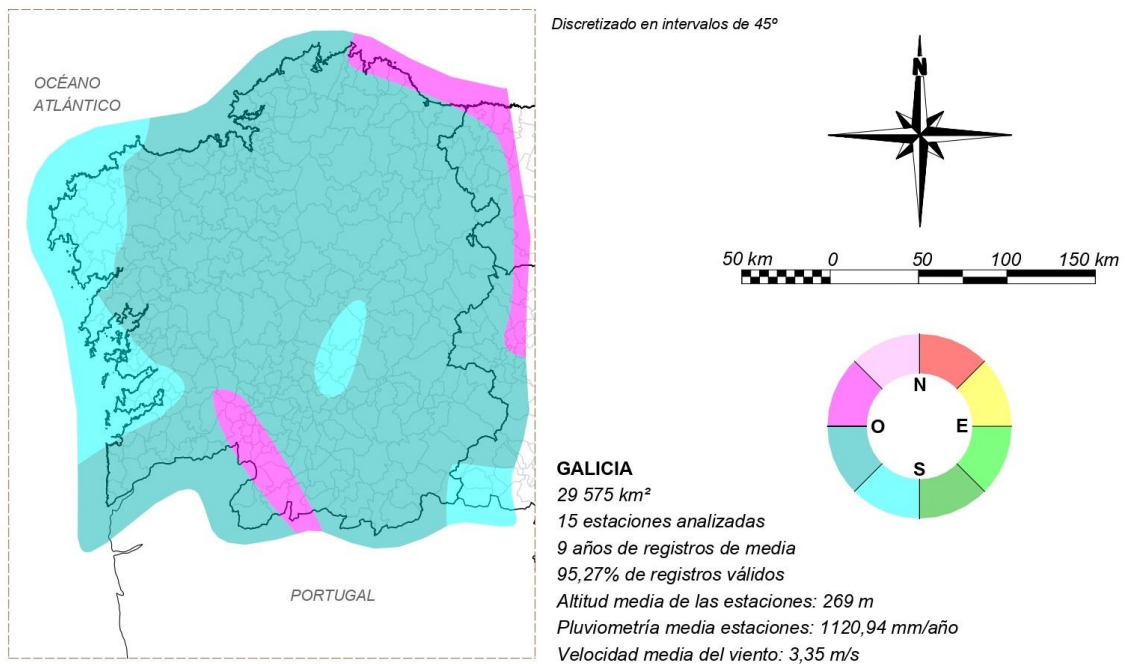


5.3, Mapa de exposición media anual a la lluvia batiente, índice daDRI.- Galicia

Adicionalmente, se ha obtenido el mapa de “Dirección de la máxima exposición a la lluvia batiente según índice daDRI.” donde aparece la comunidad zonificada según la dirección sobre la que produce la máxima exposición a la lluvia batiente, es decir, la orientación más desfavorable de fachada. Se representa la zonificación mediante el código de colores indicado en la figura 5.4, discretizado en intervalos de 45°.

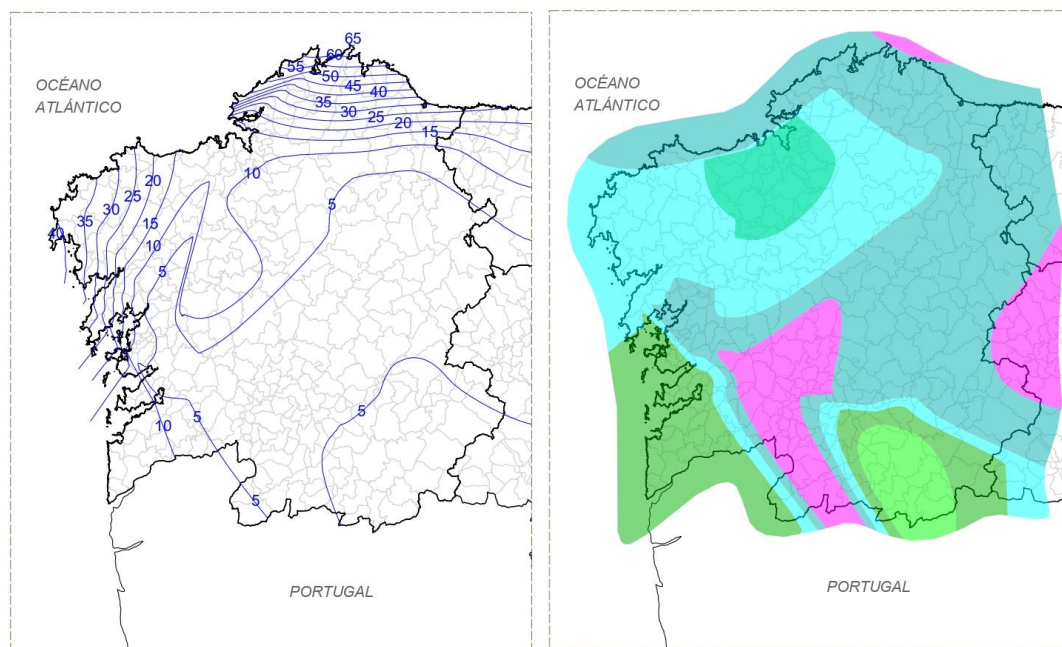
En la figura 5.4 se puede apreciar como en Galicia hay una clara predominancia de la dirección suroeste a presentar valores máximos del índice daDRI, especialmente entre los 225° y 270°, lo que concuerda con la dirección de los vientos atlánticos predominantes durante los episodios de borrasca que se producen recurrentemente en la Comunidad Autónoma.

El valor máximo de exposición daDRI se identifica en la estación de Cabo Vilán, con un valor de 9,666 m²/s. En contraste, el valor mínimo se da en O Carballiño, con un valor daDRI escalar de 0,931 m²/s.



5.4, Mapa de dirección de la máxima exposición a la lluvia batiente según índice daDRI.- Galicia

Con respecto al índice dDRWP, se obtiene de igual forma su correspondiente mapa de exposición “Exposición media anual a presión eólica simultánea a la lluvia batiente, índice dDRWP (Pa).” y el mapa de “Dirección de la máxima exposición a la presión simultánea a la lluvia batiente según índice dDRWP.” que se presentan en las figuras 5.5 y 5.6 respectivamente.



5.5, Mapa de exposición media anual a presión eólica simultánea a la lluvia batiente, índice dDRWP (Pa) y 5.6, Mapa de Dirección de la máxima exposición a la presión simultánea a la lluvia batiente según índice dDRWP. – Galicia

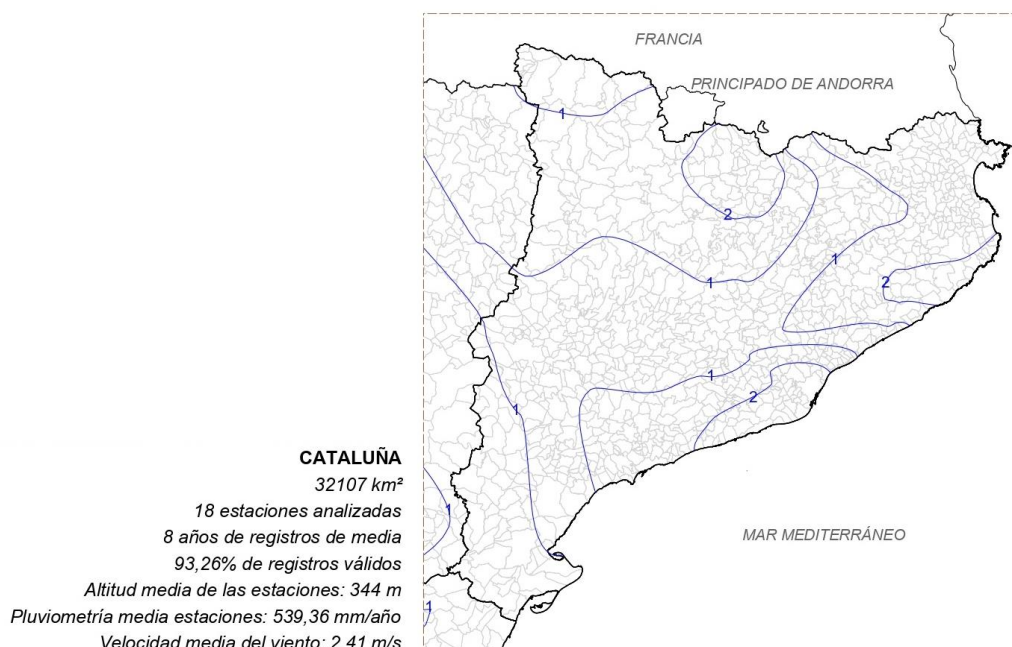
Del mapa de exposición dDRWP 5.5 podemos observar como las curvas de nivel (a escalas de 5 Pa) se concentran en las zonas de costa con valores además mucho más elevados que en el interior, ya que son las más expuestas a los vientos del océano Atlántico y por tanto donde es más notable la contribución del viento a la penetración del agua atmosférica. Por otro lado, los

valores máximos de dDRWP se dan principalmente para la dirección sudoeste, aunque a diferencia del mapa direccional daDRI, también aparecen zonas de máxima exposición para la dirección sudeste.

El valor máximo de exposición dDRWP se identifica en la estación de Estaca de Bares, con un valor de 65,222 Pa. En contraste, el valor mínimo se da, de nuevo, en O Carballiño con un valor dDRWP escalar de 0,767 Pa.

5.2.2 Mapas de Cataluña:

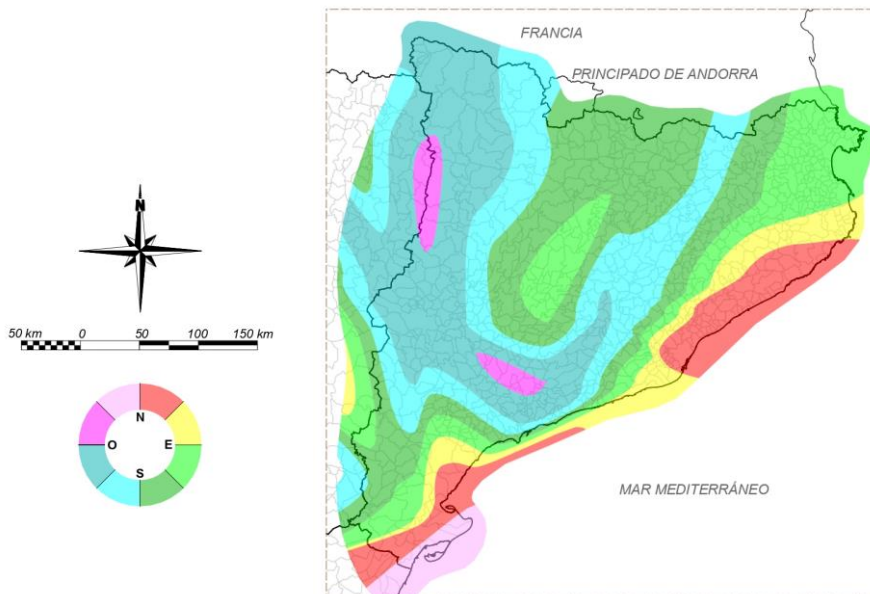
En la comunidad de Cataluña se puede observar un mapa de exposición daDRI con 2 niveles de exposición, dándose el valor más alto en la costa mediterránea y próximo a la zona Pirenaica y el menor en la zona interior de la región. En este caso, los valores son mucho más regulares por todo el territorio en comparación con Galicia. También son valores mucho menores, solo encontramos dos niveles de exposición daDRI comprendidos entre $1 \text{ m}^2/\text{s}$ y $2 \text{ m}^2/\text{s}$ anuales.



5.7 Mapa de exposición media anual a la lluvia batiente, índice daDRI. - Cataluña

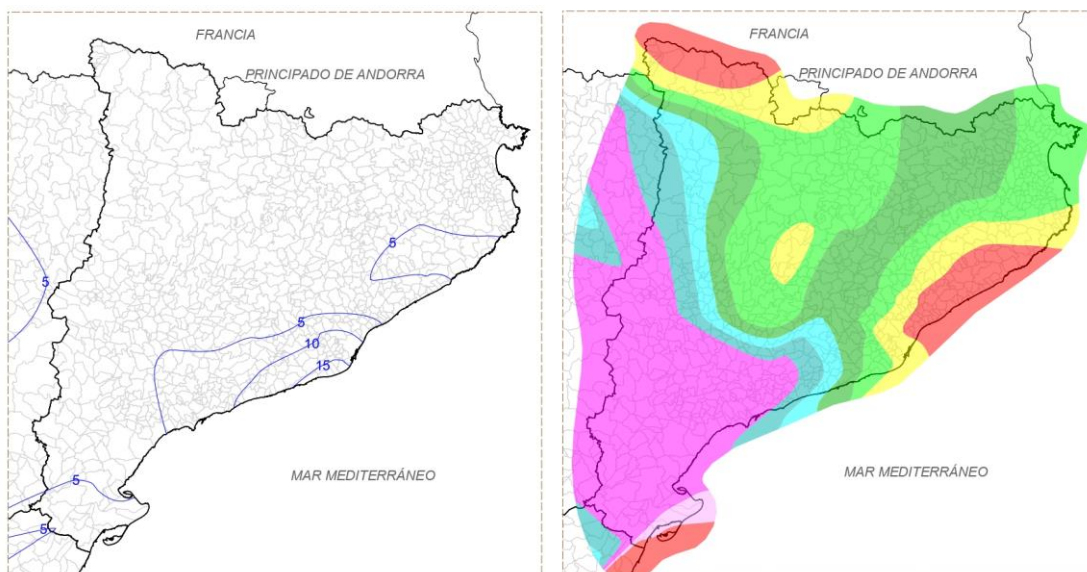
El mapa de daDRI direccional en Cataluña presenta exposición máxima para dirección predominantemente sur, aunque también encontramos en la costa de Barcelona y Gerona exposiciones máximas para dirección norte.

El valor máximo de exposición daDRI se identifica en la estación de Barcelona Aeropuerto, con un valor de $2,958 \text{ m}^2/\text{s}$. En contraste, el valor mínimo se da en Tárrega, con un valor daDRI escalar de $0,419 \text{ m}^2/\text{s}$.



5.8 Mapa de dirección de la máxima exposición a la lluvia batiente según índice daDRI. - Cataluña

De nuevo, el mapa de dDRWP muestra una distribución de las isolíneas en incrementos de 5 Pa con valores mucho menores que en Galicia. Los valores máximos se dan en la costa de Barcelona y los mínimos en todo el interior de la región.



5.9, Mapa de exposición media anual a presión eólica simultánea a la lluvia batiente, índice dDRWP (Pa) y 5.10, Mapa de Dirección de la máxima exposición a la presión simultánea a la lluvia batiente según índice dDRWP. - Cataluña

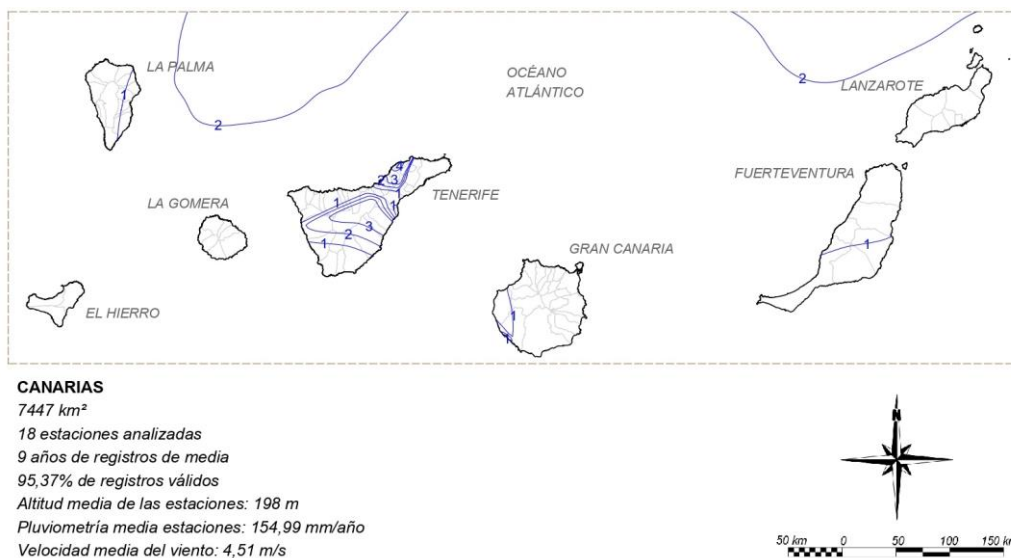
El mapa dDRWP direccional presenta el rango de direcciones completo, donde se podría señalar predominancia de la dirección sureste para las provincias de Barcelona y Gerona, en Tarragona predominan las direcciones entre 270° y 315° y para la provincia de Lérida nos encontramos con exposiciones dDRWP máximas para prácticamente todas las direcciones del espectro. Excepto para las provincias de Barcelona y Gerona, los mapas de exposición

direccional en este caso no presentan tanta similitud como en el caso de Galicia, donde eran prácticamente idénticos a rasgos generales.

El valor máximo de exposición se identifica en la estación de Barcelona Aeropuerto, con un valor de 16,322 Pa. En contraste, el valor mínimo se da en Ripoll con un valor de 0,742 Pa.

5.2.3 Mapas de las Islas Canarias:

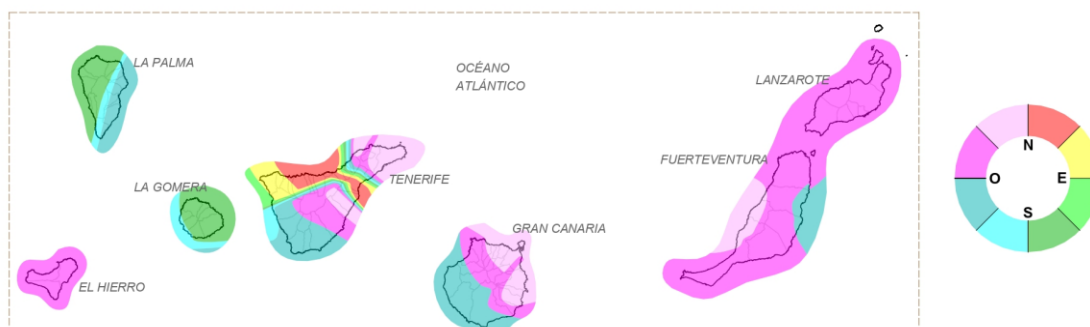
El mapa de exposición daDRI en las Islas Canarias también muestra valores más pequeños que en Galicia, como sucede en Cataluña, ya que es de hecho la comunidad con valores más bajos de daDRI de media. A pesar de ello, aparecen dos isolíneas de nivel de exposición más que en Cataluña, de valor $3\text{ m}^2/\text{s}$ y $4\text{ m}^2/\text{s}$ anuales en la isla de Tenerife, que es la única isla donde se localizan estos valores máximos de exposición.



5.11, Mapa de exposición media anual a la lluvia batiente, índice daDRI. - Islas Canarias

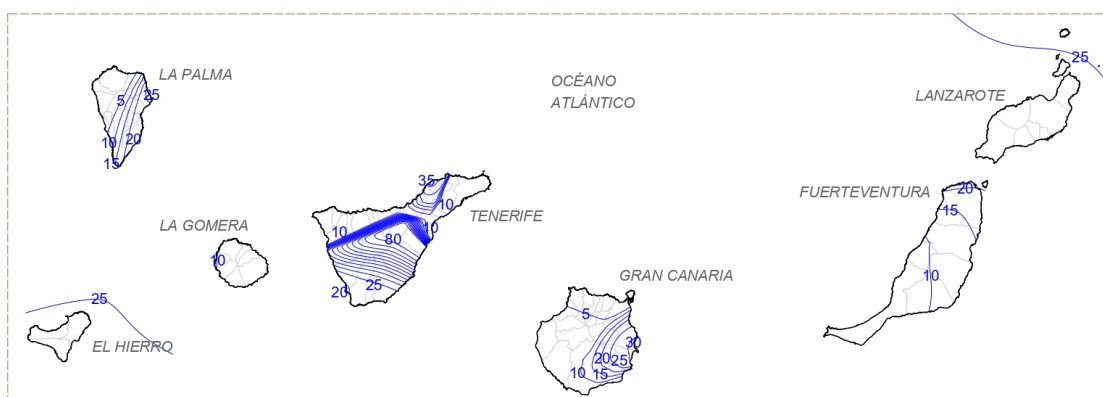
El valor máximo de exposición se identifica en la estación de Tenerife Norte Aeropuerto, con un valor de $3,665\text{ m}^2/\text{s}$. En contraste, el valor mínimo se da en Pájara, con un valor de $0,131\text{ m}^2/\text{s}$.

El mapa de daDRI direccional muestra como para cada isla se da la exposición máxima para direcciones diferentes. En las islas de La Palma y La Gomera predomina la dirección sureste, en Lanzarote, Fuerteventura, El Hierro y Gran Canaria predomina la dirección oeste mientras que en Tenerife se dan exposiciones máximas para todo el rango de direcciones. En esta orientación de máxima exposición influye decisivamente el posicionamiento de la estación meteorológica, así como la orografía circundante, que canaliza la orientación de los vientos durante los episodios de precipitación.



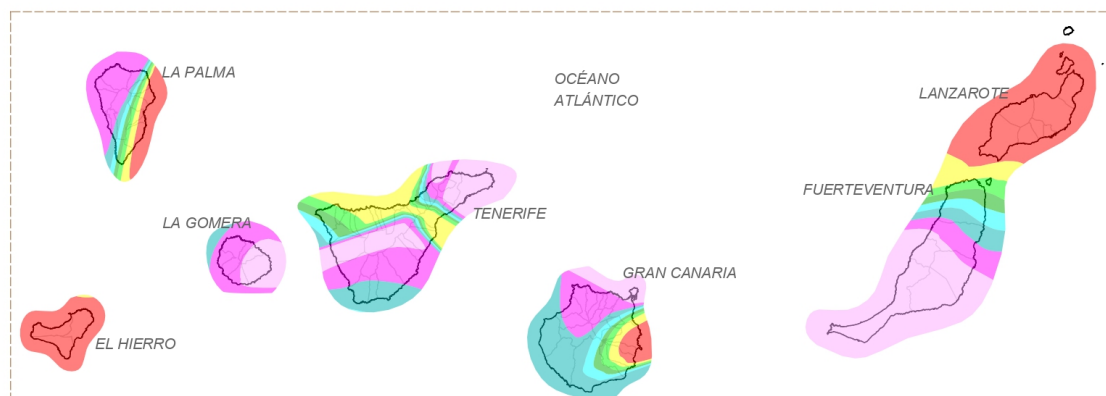
5.12 Mapa de dirección de la máxima exposición a la lluvia batiente según índice daDRI. – Islas Canarias

El mapa de exposición dDRWP muestra isolíneas de valores entre 5 Pa y 80 Pa encontrándose este máximo de forma aislada en Tenerife, en la zona del Teide. Cada isla presenta de nuevo una distribución distinta, con valores de exposición entre 5 Pa y 30 Pa, a excepción de Tenerife, y encontrando mayor concentración de isolíneas en Tenerife, La Palma y Gran Canaria. En estas dos últimas islas y en Lanzarote, los mayores valores de exposición dDRWP se dan en la zona este, disminuyendo a medida que nos desplazamos hacia el oeste.



5.13, Mapa de exposición media anual a presión eólica simultánea a la lluvia batiente, índice dDRWP (Pa) – Islas Canarias

El mapa de dDRWP direccional presenta exposiciones máximas para direcciones distintas que en el caso del índice daDRI. En este caso se observa mayor diversidad de direcciones en todas las islas (excepto en El Hierro) con fuerte influencia de la dirección noroeste en general a ser la causante de las exposiciones dDRWP más desfavorables.



5.14, Mapa de Dirección de la máxima exposición a la presión simultánea a la lluvia batiente según índice dDRWP. – Islas Canarias

El valor máximo de exposición se identifica en la estación de Izaña, con un valor de 83,439 Pa. En contraste, el valor mínimo se da en Tzacorte, con un valor de 2,783 Pa.

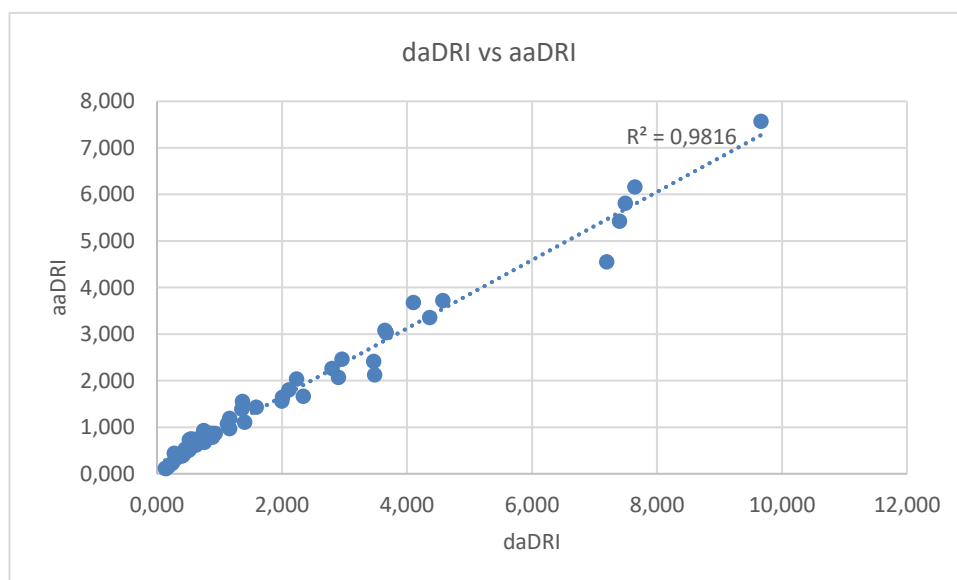
5.3 Relaciones de interés:

En este apartado se estudian las posibles correlaciones entre los parámetros de exposición y meteorológicos obtenidos y analizados en las estaciones. Estas correlaciones se estudian en forma de gráficos de dispersión, donde se representan en los ejes los parámetros de estudio y cada punto representa la estación a la que corresponden los valores de los parámetros de los ejes X e Y.

Resulta importante analizar las correlaciones en los gráficos no solo visualmente, sino también con la ayuda del valor coeficiente de determinación R^2 . Si este valor es próximo a 1, se entiende que la proporcionalidad entre los puntos es elevada, identificándose una elevada correlación entre ambas variables, por lo que una de ellas se podría extrapolar a partir de la otra.

5.3.1 daDRI-aaDRI:

En este apartado se van a representar los índices daDRI y aaDRI de cada comunidad, con el propósito de ver la relación existente entre ambos. Se recogen en la gráfica 5.15 a continuación los valores daDRI y aaDRI de todas las estaciones de las tres comunidades.



5.18, Relación daDRI-aaDRI

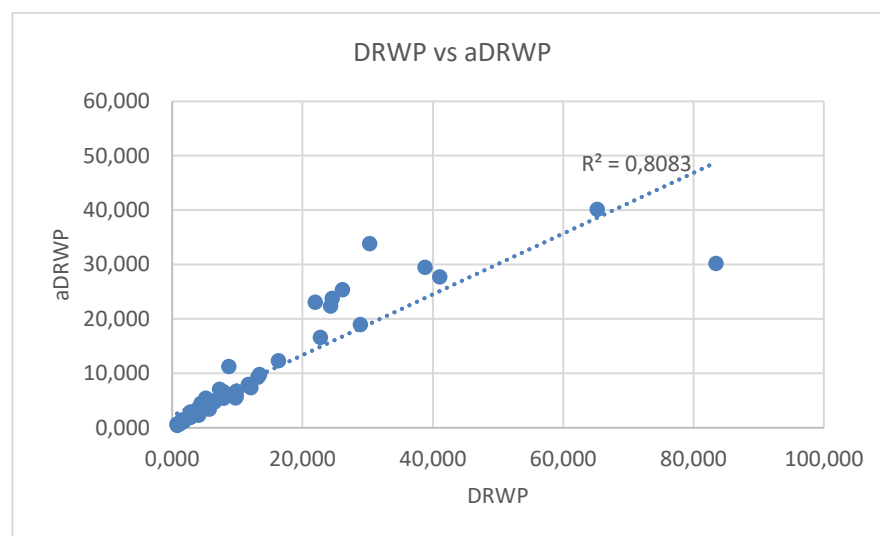
Se observa muy poca dispersión entre los puntos, además de un ajuste lineal muy bueno con un R^2 muy próximo a 1, por lo que se puede afirmar que existe una correlación proporcional y fuerte entre los índices aaDRI y daDRI. Es decir, es posible extrapolar el valor aaDRI a partir del daDRI y viceversa.

Que exista esta correlación permite obtener valores daDRI con bastante precisión, incluso en aquellos emplazamientos que solo dispongan de datos anuales (es decir, partiendo de valores aaDRI). Eso permitiría extrapolar el análisis realizado a un número mucho mayor de estaciones con registros climáticos poco exhaustivos.

El valor daDRI tiene una mayor precisión que el aaDRI, ya que caracteriza la simultaneidad de viento y lluvia de manera más exhaustiva – por ejemplo, permitiendo descartar los datos de viento de aquellos días sin lluvia. Un dato medio anual tiene muy poca precisión en este sentido, ya que se obtiene el viento medio anual de días con y sin lluvia.

5.3.2 DRWP-aDRWP:

A continuación, se va a analizar la correlación entre los valores dDRWP y aDRWP. Del mismo modo que en el apartado anterior, se van a analizar todos los valores juntos en la misma gráfica 5.16.



5.18, Relación DRWP-aDRWP

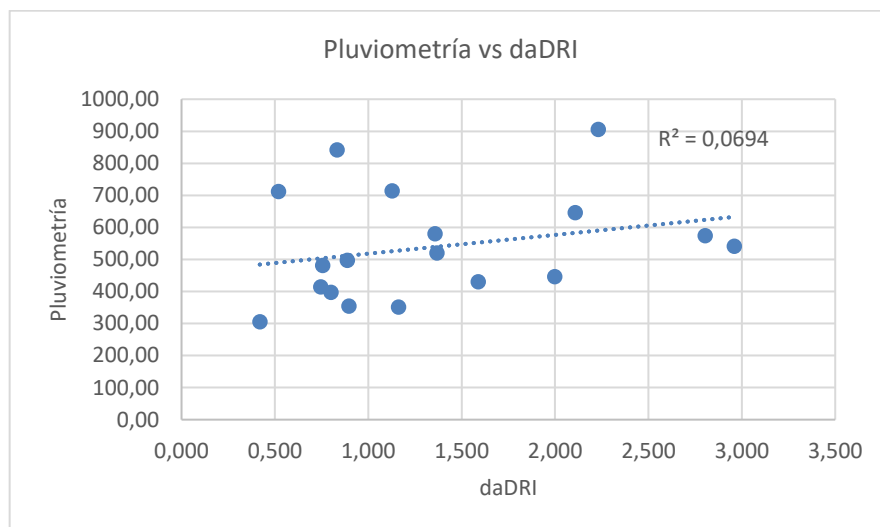
A diferencia del caso anterior, con el índice DRWP no se observa una correlación tan alta entre ambos parámetros. Para valores comprendidos entre 0 m²/s y 30 m²/s aproximadamente de ambos índices, sí existe proporcionalidad clara, poca dispersión y buena correlación (R^2 más alto). Sin embargo, hay mayor dispersión entre los puntos para valores más elevados del índice, que van alejándose cada vez más del ajuste lineal, por lo que para emplazamientos que presenten índices de valores por encima de, aproximadamente, 30 m²/s no se debería asumir proporcionalidad entre ambos índices.

Es decir, no se deberían extrapolar un parámetro a partir del otro. Quizás a mayor base muestral de valores DRWP elevados se pudiese ajustar una buena proporcionalidad, pero con la obtenida en este proyecto no resulta adecuado asumir proporcionalidad en este

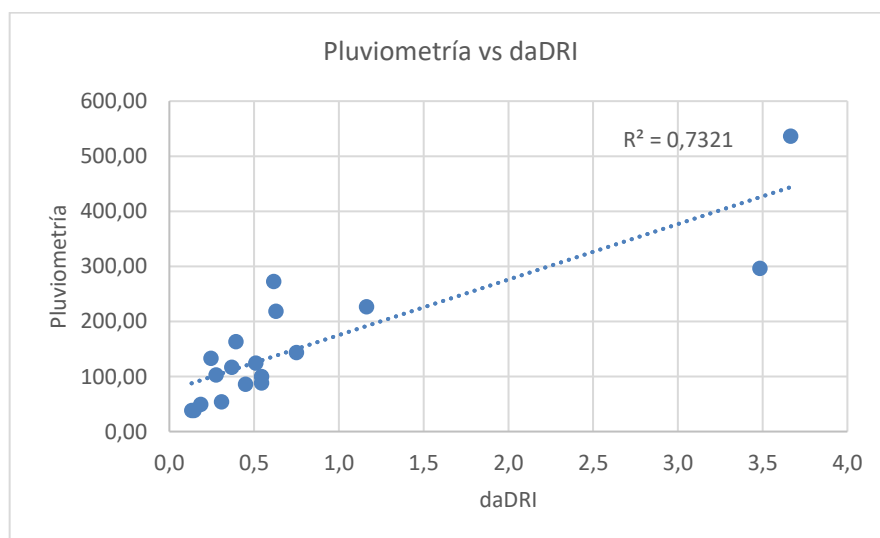
rango. En definitiva, no se debe usar salvo que no haya otra opción – por ejemplo, en ausencia de registros diarios y disponibilidad únicamente de registros anuales, asumiendo que se va a producir una pérdida de precisión.

5.3.3 Pluviometría media anual-daDRI

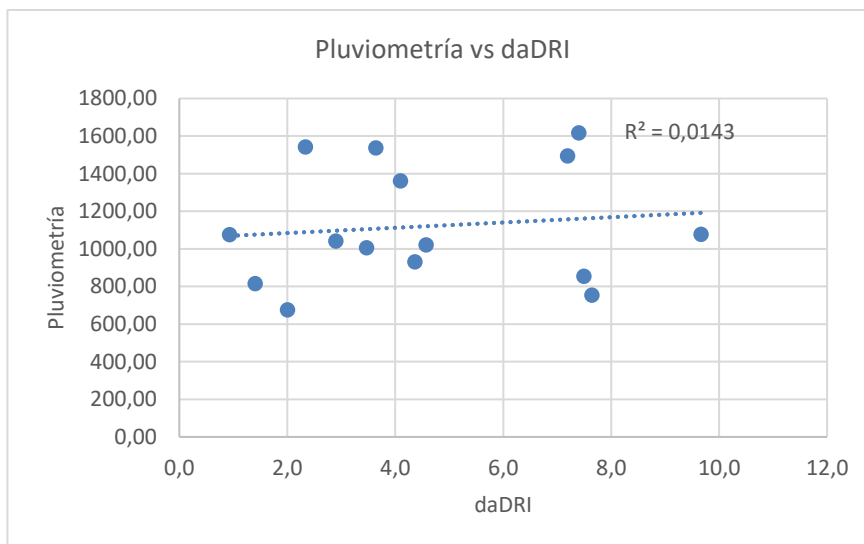
El Código Técnico de la Edificación asume que los valores medios anuales de pluviometría son los que se han de utilizar para caracterizar el grado de impermeabilidad requerido. Así, debería existir una correlación fuerte entre este valor de pluviometría y la exposición de las fachadas a la lluvia (índice daDRI). Mediante el análisis de la correlación por comunidades se muestra si existe realmente proporcionalidad o fuerte relación entre ambos valores.



5.19, Pluviometría vs daDRI para las estaciones de Cataluña



5.20, Pluviometría vs daDRI para las estaciones de Islas Canarias



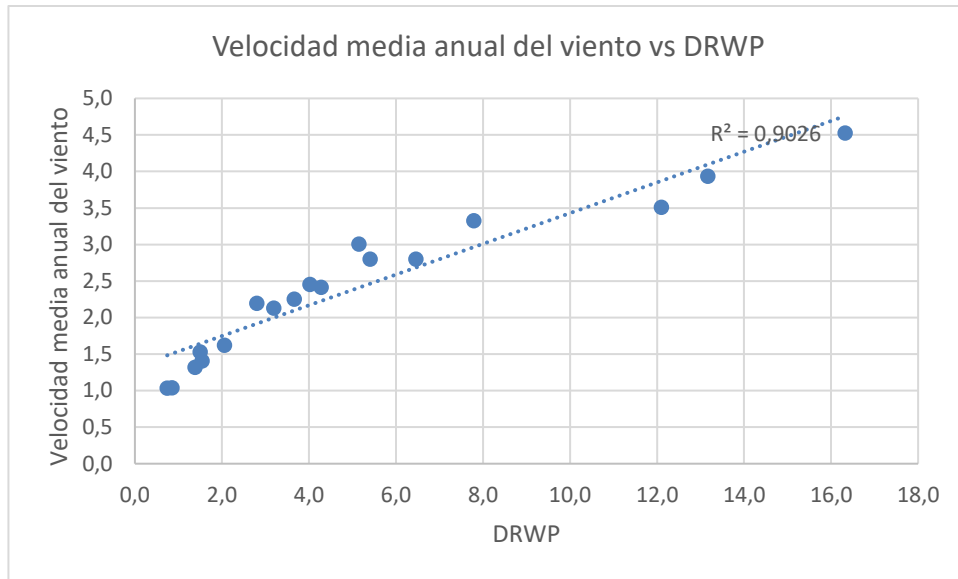
5.21, Pluviometría vs daDRI para las estaciones de Galicia

Se puede concluir a la vista del análisis realizado, que la pluviometría media anual y el índice daDRI no presentan resultados comparables. El valor R^2 es muy bajo para las estaciones y aunque en el caso de las Islas Canarias parezca elevado, se puede apreciar como la distribución realmente presenta demasiada dispersión y, eliminando los dos valores con mayores daDRI y pluviometría, el ajuste es peor y con mucho menor R^2 .

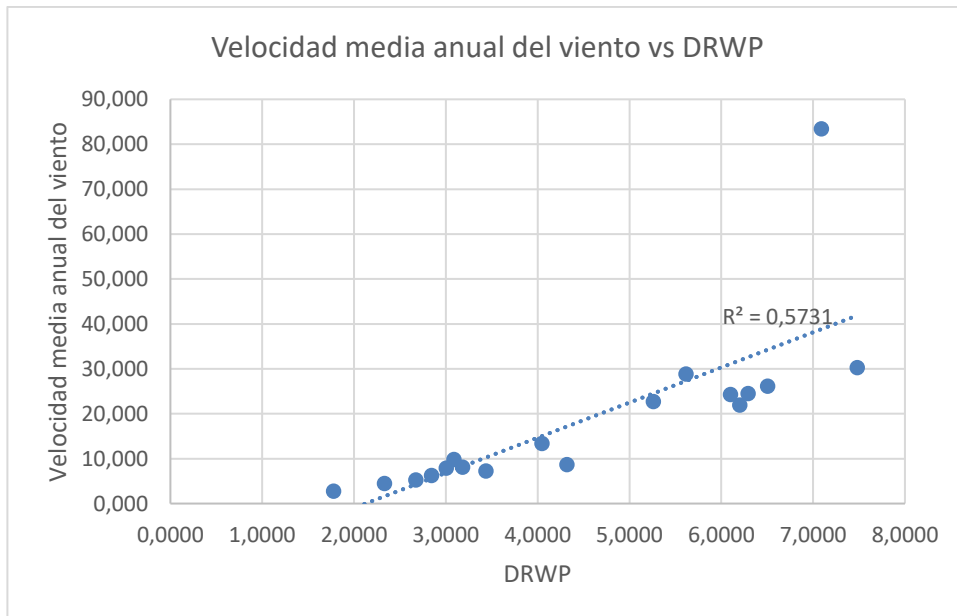
Por tanto, el cálculo que asume el CTE para el grado de impermeabilidad puede resultar inadecuado ante las solicitaciones ambientales realmente existentes teniendo en cuenta únicamente el parámetro de pluviometría media anual, ya que se acaba de demostrar que no resulta representativo a la cantidad de agua recibida por las fachadas.

5.3.4 Velocidad eólica – DRWP:

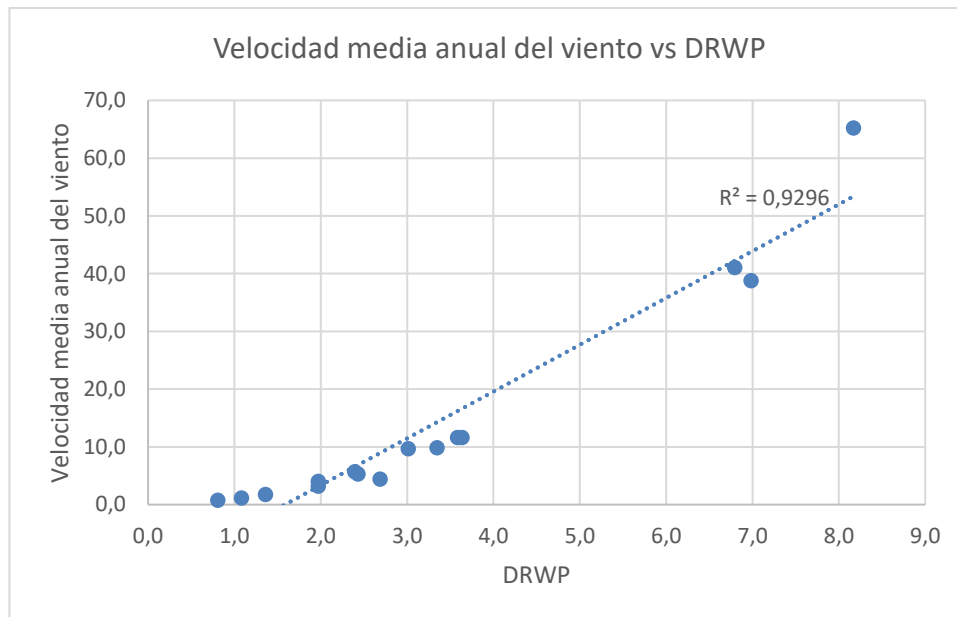
El segundo parámetro que considera el CTE para la caracterización de la exposición es la velocidad media del viento, parámetro que comparamos con el índice dDRWP con ánimo de comprobar si resultan relacionables.



5.22, Velocidad media anual del viento vs DRWP para las estaciones de Cataluña



5.23, Velocidad media anual del viento vs DRWP para las estaciones de Islas Canarias



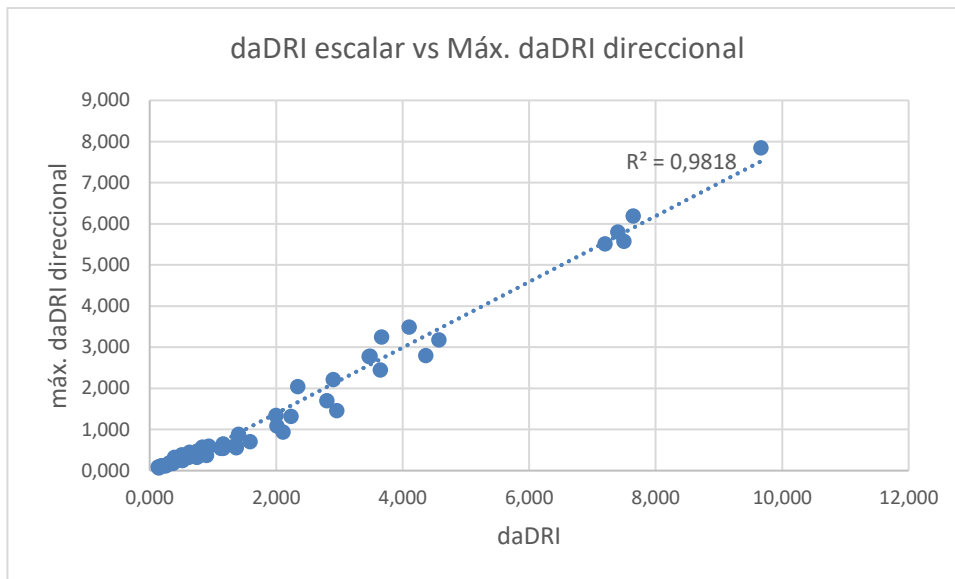
5.24, Velocidad media anual del viento vs DRWP para las estaciones de Galicia

En este caso, las comunidades de Cataluña y Galicia muestran un grado de correlación que podríamos considerar como válido ya que están muy próximos a 1. Aunque las Islas Canarias ofrecen un grado bajo de correlación, esto es debido a la gran dispersión del punto que representa a los valores de a la estación de Izaña, situada en el Teide. Este dato se podría explicar porque recibe vientos muy fuertes debido a su elevada exposición en lo alto de la cima, que no se corresponden con los vientos que acontecen cuando hay episodios de precipitación.

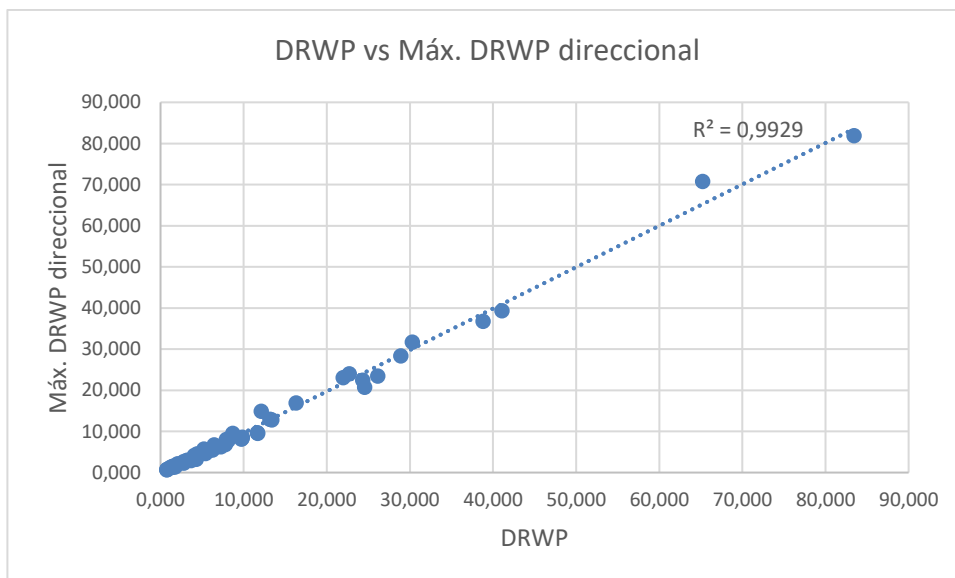
Teniendo esto en cuenta, se puede decir que la velocidad media anual del viento sí es comparable y relacionable con el índice DRWP. De hecho, esta relación resulta de gran ayuda a la hora de determinar el valor DRWP para emplazamientos donde no existen registros de lluvia y velocidad de viento simultáneos, ya que se podría asumir el valor medio de velocidad del viento para obtener la presión eólica de forma aproximada (considerando todos los registros, exista simultaneidad o no con la precipitación).

5.3.5 Máxima exposición escalar – Máxima exposición direccional para daDRI y DRWP:

Finalmente, se analiza la relación entre los valores de los índices daDRI y DRWP escalares con los correspondientes valores máximos direccionales. Esto significa que se van a comparar los valores de los índices que no tienen en cuenta la dirección del viento, escalares, con los que sí la tienen, direccionales.



5.25, daDRI escalar vs Máximo daDRI direccional



5.26, DRWP escalar vs Máximo DRWP direccional

En las gráficas anteriores, se puede ver que en ambos casos la correlación de los valores escalares con los direccionales de todas las estaciones guarda una proporcionalidad muy elevada, valor de R^2 prácticamente 1, y no se observa gran dispersión entre los puntos. Por lo que, se podría extrapolar el máximo valor direccional de cualquiera de los dos índices a partir de su valor escalar y viceversa.

Esta relación permitiría realizar un cálculo mucho más simple de la exposición sin necesidad de repetir cada cálculo para cada posible orientación del emplazamiento. Además, permitiría caracterizar la exposición sobre la fachada más desfavorable del emplazamiento, incluso en ausencia de registros de dirección de viento.

Dado que generalmente, el diseño de las fachadas es uniforme para todas las orientaciones del edificio, sería precisamente ese dato máximo direccional, obtenido a partir de un mero valor escalar, el que debería considerarse para el diseño de la estanquidad de la solución constructiva.

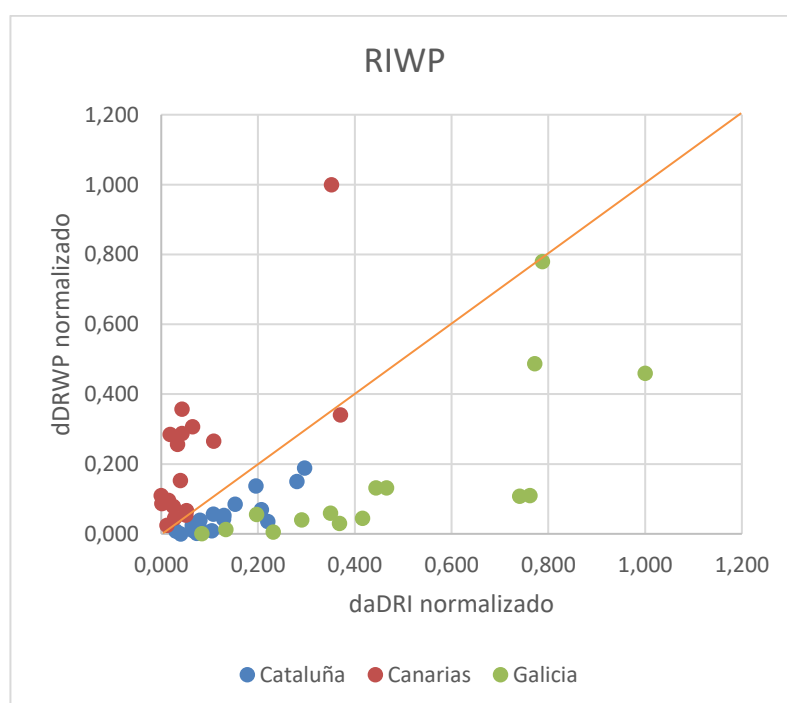
5.4 RIWP:

La hoja resumen de estaciones mencionada en el apartado 4.4 permite obtener el índice RIWP (Risk Index of Water Penetration) de cada estación. En nuestro caso, las estaciones con mayor RIWP son las de Galicia por su mayor exposición y alguna de Canarias por la elevada velocidad del viento de la zona del Teide.

Este índice se ve representado en la figura 5.27, de forma que el eje "X" es el daDRI normalizado y el eje "Y" es el dDRWP normalizado. La distancia de cada estación al origen de coordenadas es el valor de RIWP. Este valor estará comprendido entre 0 y $\sqrt{2}$ por su propia definición.

Cuanto más alejado esté el índice del origen, mayor exposición combinada presenta esa estación. Aquellos puntos que se encuentran por debajo de la bisectriz indican que su principal factor de riesgo es la cantidad de agua recibida en las fachadas (daDRI). Si están por encima de la bisectriz, el principal factor de riesgo es la presión eólica que fuerza al agua que cae (DRWP) a entrar en la matriz porosa de los materiales.

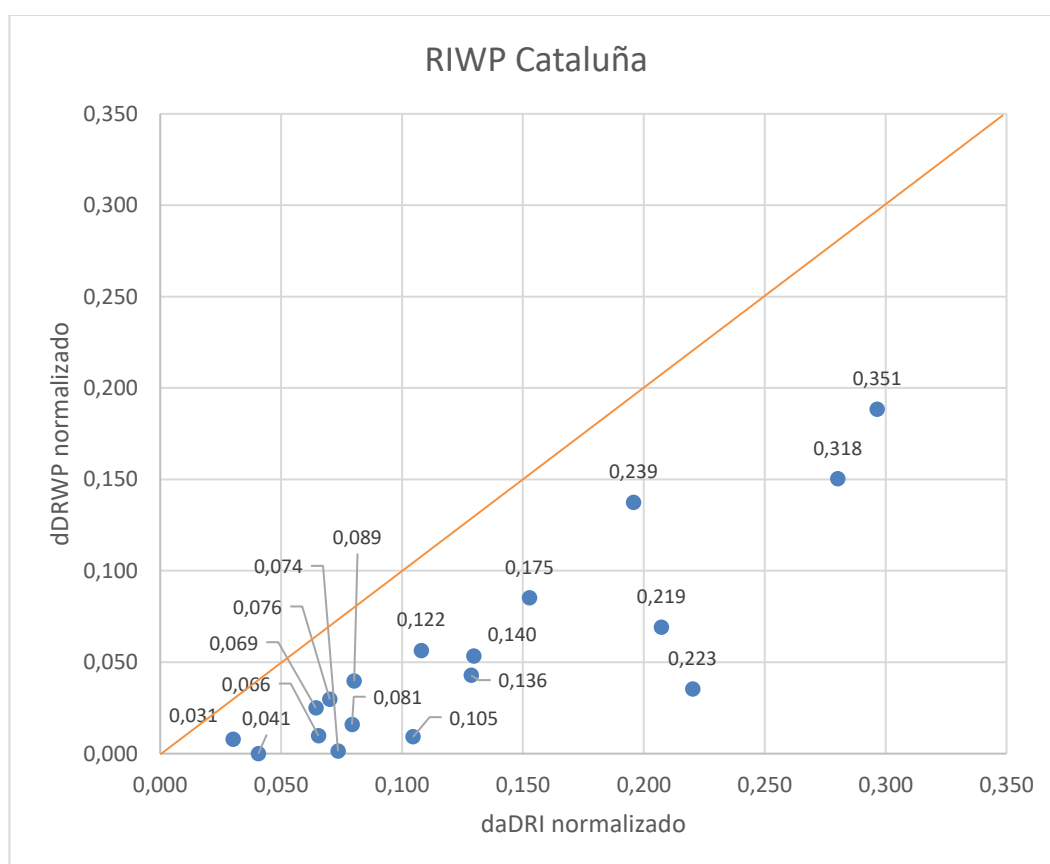
En el gráfico 5.27 se muestran los índices RIWP de las tres estaciones en conjunto, siendo los puntos azules los valores RIWP correspondientes a las estaciones de Cataluña, los rojos a las Islas Canarias y los verdes a Galicia.



5.27, RIWP de Cataluña, Islas Canarias y Galicia

Como se había anticipado, la comunidad con mayores valores de RIWP es Galicia junto con algún emplazamiento de las Islas Canarias y la que presenta menores valores del índice es Cataluña. A continuación, se van a comentar los índices RIWP de cada comunidad autónoma por separado.

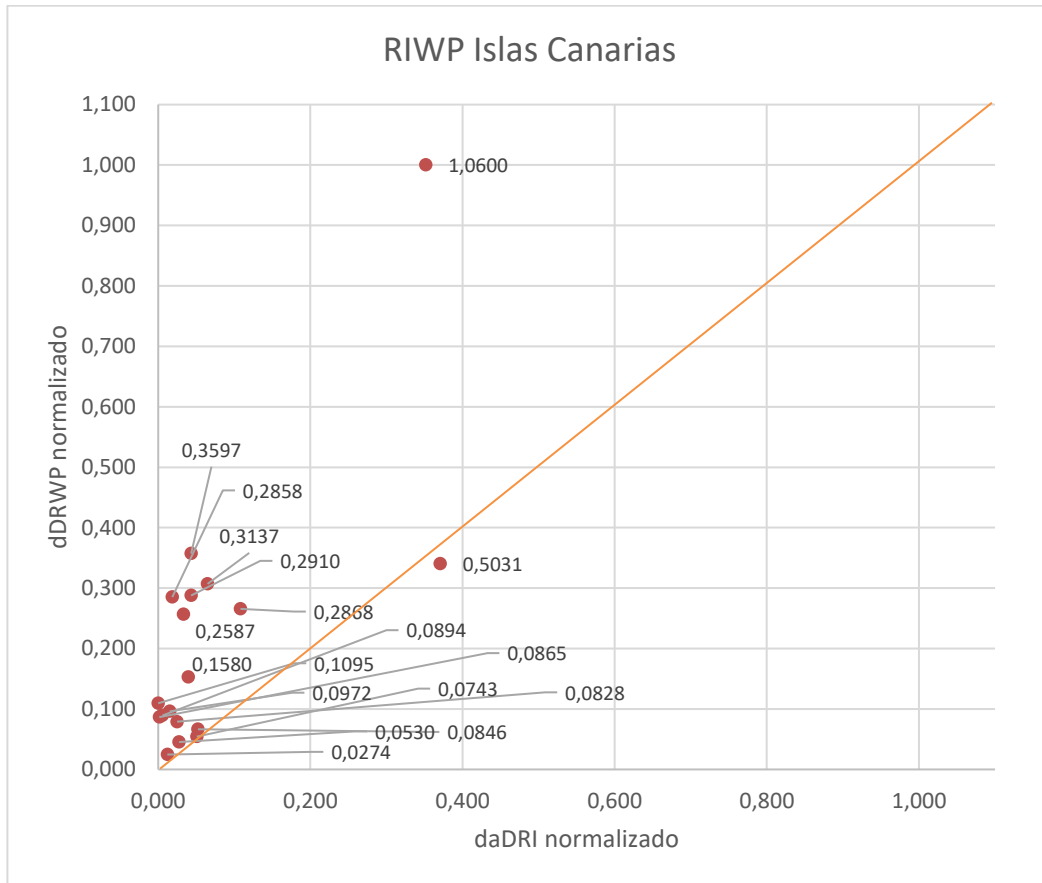
Empezando con Cataluña, se observa como el mayor valor del índice es 0,3512 que corresponde con el emplazamiento de Barcelona Aeropuerto, seguido por el emplazamiento de Barcelona – Fabra, con un índice de 0,318. Además, todos los valores se encuentran por debajo de la bisectriz por lo que se puede confirmar que, en esta comunidad, el mayor riesgo a la penetración de agua en las fachadas se debe a la cantidad de agua recibida por ellas, índice daDRI.



5.28, RIWP de Cataluña

En las Islas Canarias, se puede observar en la figura 5. un emplazamiento que dista significativamente de los demás valores obtenidos. Es el emplazamiento con mayor RIWP, 1,06, correspondiente con la estación de Izaña, situada en la montaña de Izaña en las Cañadas del Teide a 2367 metros de altura. Considerando su localización geográfica no resulta de extrañar el resultado obtenido, a pesar de estar alejado de los demás índices obtenidos en las estaciones de la comunidad autónoma.

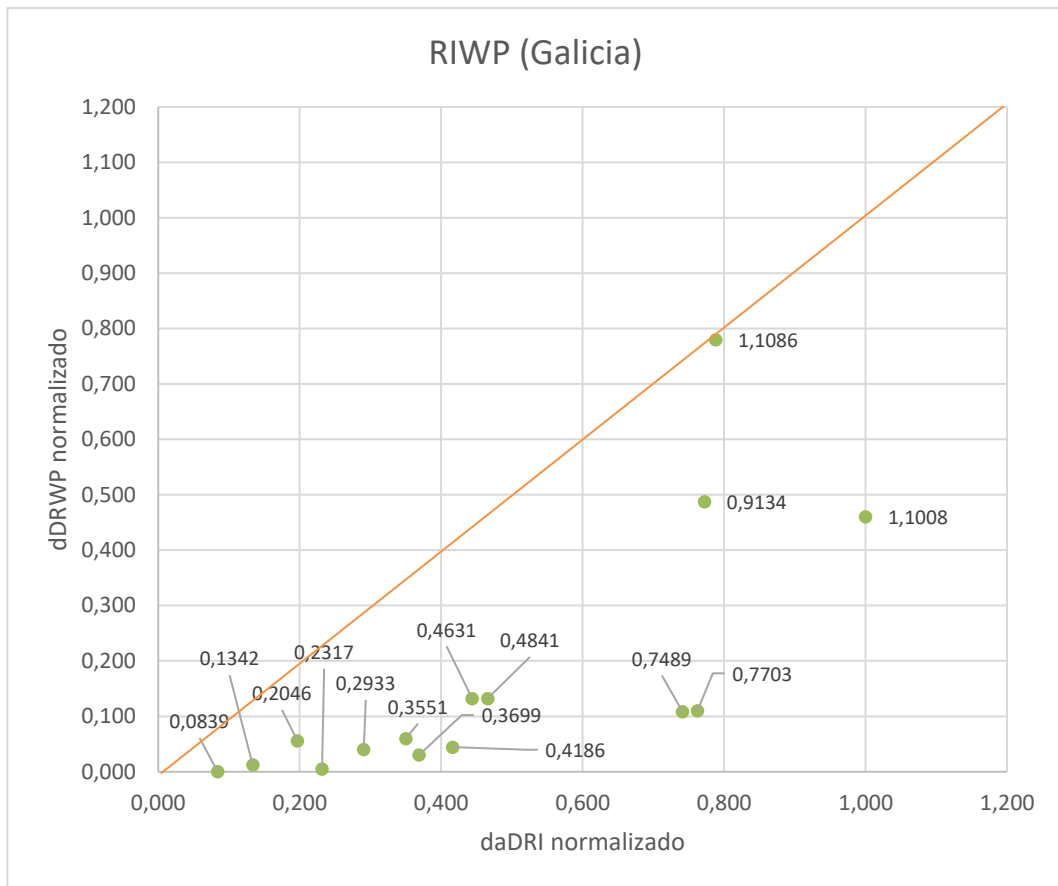
Los demás emplazamientos se encuentran por debajo del valor 0,5031 y además se encuentran por encima de la bisectriz, a diferencia de los emplazamientos de Cataluña. Por lo que en esta comunidad el riesgo principal se debe a la presión eólica sobre la lluvia incidente, dDRWP.



5.29, RIWP de Islas Canarias

Finalmente, en el caso de Galicia observamos en la figura 5. una distribución similar a Cataluña en el sentido de que todas las estaciones presentan índices RIWP por debajo de la bisectriz, por lo que en este caso también podemos señalar que el principal factor de riesgo para la penetración del agua es la cantidad de agua recibida en las fachadas, daDRI.

Sin embargo, en esta comunidad se dan valores más altos que en Cataluña y en las Islas Canarias. El valor máximo de exposición combinada se da en 1,1086 en la estación de Estaca de Bares, a parte de otros cuatro emplazamientos con valores por encima de 0,5, lo cual no ocurre en ninguna de las otras dos comunidades.



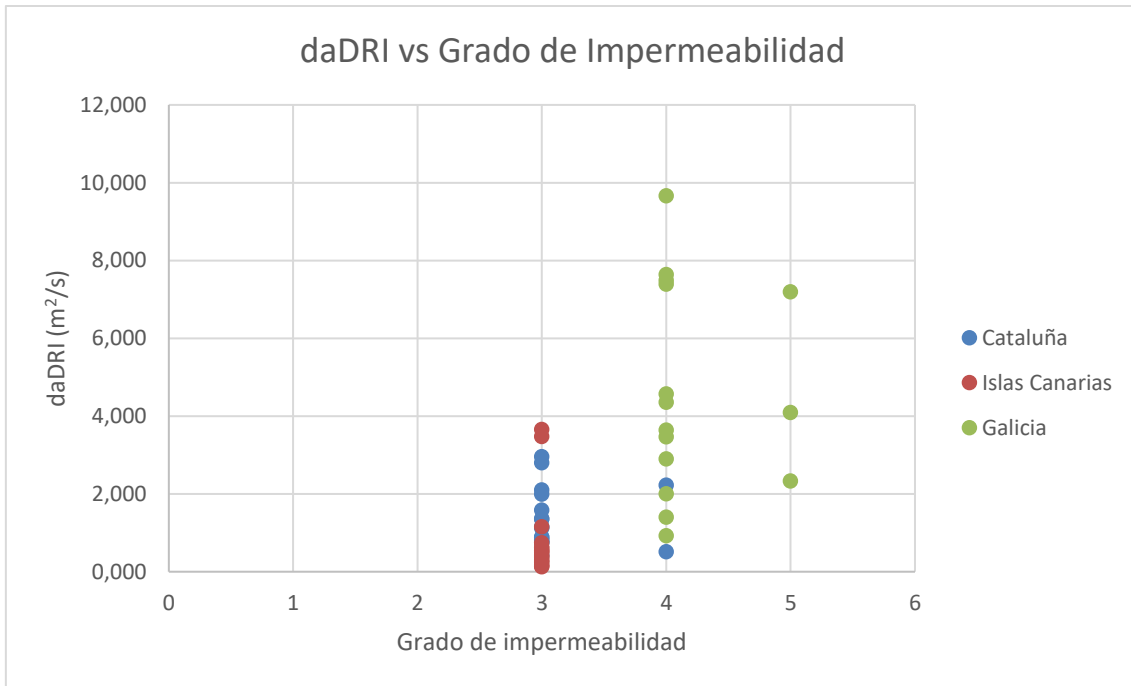
5.30, RIWP de Galicia

5.5 Comparación con el CTE:

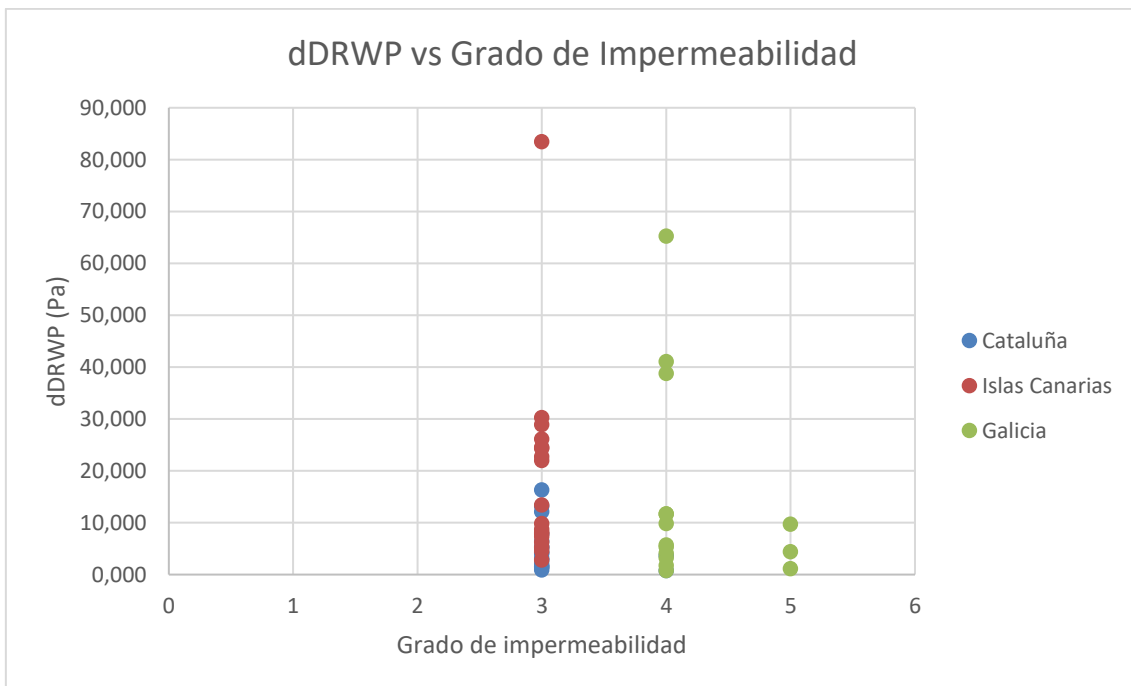
Finalmente, obtenidos los índices daDRI y dDRWP de cada estación de cada comunidad, podemos hacer una comparación con el grado de impermeabilidad exigido por el CTE para los emplazamientos estudiados y así comprobar si las conclusiones que se han obtenido con respecto a las relaciones entre parámetros tienen sentido.

El cálculo del grado de impermeabilidad se ha realizado conforme al procedimiento indicado en el CTE DB-HS1. Suponiendo una altura de edificio de menos de 15 metros y terreno despejado y sin obstáculos, entorno del edificio del tipo E0. Esas condiciones son equivalentes a las que se encuentran generalmente las estaciones meteorológicas de las que se han recopilado los registros meteorológicos (anemómetro a 10 m de altura en un terreno despejado).

La comparación se va a realizar de nuevo mediante gráficas de dispersión para comprobar si existe correlación de proporcionalidad entre ambos resultados.



5.31, daDRI vs Grado de Impermeabilidad



5.32, dDRWP vs Grado de Impermeabilidad

En los gráficos 5.31 y 5.32 anteriores se puede observar cómo fachadas con mismo grado de impermeabilidad reciben cantidades de agua y de presión muy diferentes entre sí. Por otro lado, se puede ver cómo hay emplazamientos con grados de impermeabilidad 3 para los que el índice daDRI y/o dDRWP es mayor que emplazamientos con grados 4 y 5, lo cual supone una gran incoherencia y de nuevo lleva a la misma conclusión anterior. Es decir, no hay correlación entre los índices de exposición daDRI y dDRWP y el grado de impermeabilidad propuesto por el CTE.

En definitiva, se pone de manifiesto que el método propuesto por el CTE no se ajusta a la realidad de las exigencias a las que están sometidas las fachadas climáticamente y confirma que se necesita un análisis más preciso tanto de los datos meteorológicos utilizados para caracterizar la exposición al agua atmosférica, como del análisis territorial. Ya que hay territorios que presentan diversidad geográfica y con ello diferentes exigencias climatológicas que afectan al riesgo de exposición.

6. Conclusiones

El objetivo de este proyecto es proporcionar una mejor caracterización que la existente en el CTE de la exposición de las fachadas a la penetración del agua atmosférica en comunidades autónomas del territorio español mediante índices reconocidos y usados internacionalmente.

Para la caracterización del riesgo de penetración de agua de lluvia es necesario obtener la cantidad de agua de lluvia que impacta sobre la superficie vertical de las fachadas, índice daDRI o indicador de lluvia batiente, y la presión eólica con la que este aporte de agua es obligado a introducirse en los materiales, índice DRWP.

Por separado, el análisis y obtención de estos índices permite realizar mapas de caracterización más detallados y adaptados a las exigencias climáticas dependientes de cada emplazamiento y región. Los mapas obtenidos en este proyecto proporcionan información más exhaustiva y prestacional que los actualmente utilizados, que carecen de una correcta división geográfica y de un correcto ajuste de los valores utilizados. Con los nuevos mapas obtenidos, también se pueden conocer las orientaciones más desfavorables según la región para cada índice estudiado.

Al comprobar las correlaciones entre los distintos parámetros, también se ha determinado que no es adecuada la elección de los parámetros climatológicos utilizados en el CTE para definir el grado de impermeabilidad. Además, los índices daDRI y DRWP combinados proporcionan el RIWP, índice que cuantifica el riesgo relativo (asociado a la base muestral) a la penetración de agua en las fachadas de cada emplazamiento. Los resultados obtenidos con este método, ampliamente aceptado y contrastado, han resultado como se esperaba muy dispares a los resultantes de aplicar el método del CTE.

El análisis llevado a cabo depende en todo caso de la disponibilidad de registros diarios suficientes en cada emplazamiento. Hay que tener en cuenta que estaciones que podrían haber proporcionado mayor cobertura del terreno no contaban con registros adecuados.

Algunas de las correlaciones obtenidas en este trabajo permiten ahora, por un lado, obtener valores daDRI con precisión a partir de datos anuales. Por otro lado, analizar estaciones sin registros de dirección de viento realizando un cálculo más simple y sin necesidad de repetir cada cálculo para cada posible orientación del emplazamiento, además de caracterizar la exposición sobre la fachada más desfavorable del emplazamiento. También permite asumir el valor medio de velocidad del viento para obtener la presión eólica de forma aproximada. Todo esto permitiría extrapolar el análisis realizado a un número mucho mayor de estaciones con registros climáticos poco exhaustivos.

Dado que generalmente, el diseño de las fachadas es uniforme para todas las orientaciones del edificio, sería precisamente ese dato máximo direccional, obtenido a partir de un mero valor escalar, el que debería considerarse para el diseño de la estanquidad de la solución constructiva.

Finalmente, se ha corroborado la importancia de elegir correctamente los parámetros representativos del riesgo de penetración de agua en la fachada de los edificios para definir de forma adecuada y prestacional las exigencias constructivas y de diseño de los edificios. El fin de una correcta solución constructiva es minimizar los riesgos, no solo constructivos, sino también de salud de los ocupantes, tanto para la construcción de nuevos edificios, como para la rehabilitación de los ya existentes. Adicionalmente, sería de gran interés continuar con el estudio de las demás comunidades españolas y, en la medida de lo posible, más emplazamientos en los territorios ya analizados con el ánimo de mejorar la normativa española en su conjunto y, por tanto, mejorar en gran medida las soluciones constructivas.

7. Bibliografía

- [1] Blocken B., Carmeliet J. (2004). A review of wind-driven rain research in building science. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 92, 1079–1130
- [2] Sahal A.N., Lacasse M.A. (2004). Experimental Assessment of Water Penetration and Entry into Siding-clad Wall Specimen. Internal Report No. 862, National Research Council Canada, Ottawa.
- [3] Sahal N. (2006). Proposed approach for defining climate regions for Turkey based on annual driving rain index and heating degree – days for building envelope design. *Build. Environ.* 41, 520–526
- [4] Del Coz J.J., Rabanal F.P., García P.J., Domínguez J., Rodríguez B., Pérez J.M. (2013). Hygrothermal properties of light weight concrete: experiments and numerical fitting study. *Constr. Build. Mater.* 40, 543–555,
- [5] Franke L., Schumann I., vanHees R., vanderKlugt L., Naldini S., Binda L., Baronio G., vanValen K., Mateus J. (1998). *Damage Atlas: Classification and Analyses of Damage Patterns Found in Brick Masonry*. European Commission Research Report nr 8, vol2. Fraunhofer IRB Verlag.
- [6] Carll, C. (2001). Rainwater intrusion in light-frame building walls. In: *Second Annual Conference on Durability and Disaster Mitigation in Woodframe Housing*. Forest Products Society, 33-40, Madison, WI, USA.
- [7] Pérez-Bella, J. M., Domínguez-Hernández, J., Rodríguez-Soria, B., del Coz-Díaz, J. J., Cano-Suñén, E. (2015). Revisión y mejora de la caracterización del grado de impermeabilidad requerido por el CTE DB-HS1 para fachadas de edificación. *Informes de la Construcción*.
- [8] Pérez-Bella, J. M., Domínguez-Hernández, Cano-Suñén, E., del Coz-Díaz, J. J. (2014). Aplicación al código técnico de la edificación de avances en el estudio de la exposición a la humedad de fachadas.
- [9] Información climatológica de Galicia: <https://www.galicia.info/clima.html>
- [10] Kottek M, Grisier J, Beck C, Rudolf B, Rubel F. (2006) World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.* 15, 259-263.
- [11] Características de la precipitación en Galicia. Aemet Blog. 2017.
- [12] Características del clima canario. GEVIC. 2015.

[13] Características del clima en Cataluña: <https://www.catalunya.com/clima-9-1-9?language=es>

[14] Preguntas frecuentes del servicio AEMET OPENDATA; Versión: 1.0 (2017)
<https://opendata.aemet.es/centrodedescargas/docs/FAQs150217.pdf>

[15] Centro de descarga AEMET, Acceso General:
<https://opendata.aemet.es/centrodedescargas/productosAEMET?>

[16] Posición geográfica de las estaciones analizadas:
<https://datosclima.es/Aemehistorico/Estaciones.php>

[17] Mapas utilizados para la localización de las estaciones: Google My Maps