

# UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



## TESIS DOCTORAL

### **Evaluación del comportamiento funcional de la madera maciza en condiciones de uso exterior**

Assessment of functional performance of solid wood under outdoor use conditions.

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

**María Conde García**

Directores

**Dr. Juan Ignacio Fernández-Golfín Seco**

**Dra. Marta Conde García**

Departamento de Ingeniería Forestal

Programa de doctorado de Biociencias y Ciencias Agroalimentarias

Córdoba, mayo de 2023

TITULO: *Evaluación del comportamiento funcional de la madera maciza en condiciones de uso exterior*

AUTOR: *María Conde García*

---

© Edita: UCOPress. 2023  
Campus de Rabanales  
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A  
14071 Córdoba

<https://www.uco.es/ucopress/index.php/es/ucopress@uco.es>

---



**DOCTORANDA/O**

MARÍA CONDE GARCÍA

**TÍTULO DE LA TESIS:**

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO FUNCIONAL DE LA MADERA MACIZA EN CONDICIONES DE USO EXTERIOR

**INFORME RAZONADO DE LAS/LOS DIRECTORAS/ES DE LA TESIS****(se hará mención a la evolución y desarrollo de la tesis, así como a trabajos y publicaciones derivados de la misma)**

La doctoranda presenta y desarrolla un amplio estudio experimental sobre la caracterización del comportamiento funcional de la madera en condiciones de uso exterior en todo el territorio peninsular nacional. El estudio del Estado del Arte es completo y está actualizado y la metodología adoptada en cada uno de los trabajos que comprende la Tesis es adecuada y novedosa a nivel nacional, siguiendo cuando ha sido posible normativa internacional y acuerdos derivados del desarrollo de la Acción COST FP 1303. Los resultados obtenidos y las conclusiones extraídas están soportadas por los datos obtenidos experimentalmente, permitiendo avanzar en el establecimiento de protocolos de actuación a la hora de optimizar el diseño constructivo con madera y orientar los futuros trabajos a desarrollar en esta materia a nivel nacional.

La Tesis Doctoral es totalmente original, la primera en esta temática a nivel nacional, ampliando el conocimiento sobre el comportamiento funcional de la madera al exterior en las distintas condiciones climáticas nacionales y, por ello, amplía los trabajos que a nivel Centro y Noreuropeo se están desarrollando sobre la materia. Además del estudio del comportamiento funcional, la presente Tesis Doctoral presenta resultados de enorme utilidad para la optimización de los sistemas de medida de la humedad de la madera por el método de la resistencia eléctrica, lo que sin duda será de enorme utilidad para los sectores de la carpintería y la construcción con madera. En este tema la doctoranda y sus directores de tesis son cotitulares de una patente, licenciada desde 2022.

La Tesis Doctoral se presenta con estructura de Capítulos, en la que el Capítulo 4 incorpora los tres artículos indexados en JCR en los que la doctoranda ha intervenido como primer firmante, si bien en los distintos apartados del capítulo 4 se citan aquellos en los que la doctoranda ha intervenido directamente. Estos son los siguientes:

**Capítulo 4.1 sobre Optimización de los sistemas de monitorización del clima del material**

En este apartado se recogen todos los trabajos efectuados por la candidata sobre la mejora del sistema de medición de la humedad de la madera por métodos eléctricos.

1. Fernández-Golfín, J.I., Conde, M., Conde, M., Fernández-Golfín, J.J., Calvo, R., Baonza, M.V., de Palacios, P. 2012. Curves for the estimation of the moisture content of ten hardwoods by means of electrical resistance measurements. *Forest Systems*, 21(1), 121-127. <https://doi.org/10.5424/fs/2112211-11429>
2. Fernández-Golfín, J.I., Conde, M., Fernández-Golfín, J.J., Conde, M., Hermoso, E., Cabrero, J.C., 2014. Efecto de la temperatura de termotratamiento en el comportamiento eléctrico de la madera de pino radiata. *Maderas Ciencia y Tecnología*, 16(1), 25-36. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2014005000003>
3. Conde, M., Conde, M., Fernández-Golfín, J.I., 2021c. Improving the accuracy of wood moisture content estimation in four European softwoods from Spain. *Forest Systems*. 30(1), e002. <http://dx.doi.org/10.5424//fs/2021301-17798>

**Capítulo 4.2 sobre Caracterización relativa del riesgo de pudrición empleando el índice climático de Scheffer**

4. Fernández-Golfín, J.I., Larrumbide, E., Ruano, A., Galván, J., Conde, M., 2016. Wood decay hazard in Spain using the Scheffer index: proposal for an improvement. *Eur. J. Wood Prod.*, 74 (4), 591-599. <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1036-z>

**Capítulo 4.3. sobre Caracterización del efecto de la especie en la resistencia biológica de la madera**

5. Conde García, M., Conde García, M., Fernández-Golfín, J.I., 2021a. Species effect on decay resistance of wood exposed to exterior conditions above the ground in Spain. *Materiales de Construcción*, 71 (341), e236. <https://doi.org/10.3989/mc.2021.11320>

Capítulo 4.4. sobre Caracterización del efecto del diseño constructivo en la evaluación de la exposición de la madera  
6. Conde García, M., Conde García, M., Tenorio, J.A., Fernández-Golfín, J.I., 2021b. Experimental evaluation of the effect of different design conditions on the risk of decay in solid wood exposed to outdoor climate. Mater Construcc., 71 (341), e247. <https://doi.org/10.3989/mc.2021.12220>

Además de los 6 artículos indexados anteriores, la doctoranda ha participado en las siguientes acciones:

1. (Patente) Dispositivo para la emulación de la humedad de la madera y procedimiento asociado a dicho dispositivo. Obtentores: Juan I. Fernández-Golfín Seco; María Conde García; José J. Fernández-Golfín Seco; Marta Conde García. Fecha de concesión: 29/01/2015. Número de patente: 201231670.
2. (Contribuciones a Congresos)
  - 2.1. Fernández-Golfín, J.I., Galván, J., Conde, M., Conde, M., 2016. Effect of sawing pattern and species on the permeability to water of two conifers: radiata and Scots pine. Comunicación en COST ACTION F9 1303 Workshop “Designing with bio-based building materials: Challenges and opportunities”. Madrid, 24 y 25 de febrero de 2016.
  - 2.2. Fernández-Golfín, J.I., Conde, M., Díez, M.R., Conde, M., Acuña, L., Torres, E., Perea, E., 2017. Degradación de la madera al exterior fuera de contacto con el suelo: Efecto del clima y de la especie. Comunicación oral en el 7º Congreso Forestal Español. Plasencia, Cáceres, 26-30 de junio de 2017.
  - 2.3. Fernández-Golfín, J.I., Conde, M.; Díez, M.R., Conde, M., Acuña, L., 2016. Primeras conclusiones del proyecto BIA2013-42434R sobre degradación de la madera al exterior fuera de contacto con el suelo: Efecto del clima y de la especie. Comunicación en I Jornadas LIGNOMAD 2016 sobre Construcción con Madera y otros Materiales Lignocelulósicos. Barcelona, 20 y 21 de junio de 2016.
  - 2.4. Fernández-Golfín, J.I., Conde, M., Díez, M.R., Conde, M., Acuña, L., Torres, E., Perea, E., Troya, M.T., 2017. Decay of wood in outdoor above ground applications: Preview of results on the effect of climate and species in Spain. Comunicación en 48th International Research Group on Wood Protection Annual Meeting. Ghent, Bélgica, 4 a 8 de junio de 2017.
  - 2.5. Fernández-Golfín, J.I., Conde, M., Díez, M.R., Conde, M., Acuña, L., Torres, E., Perea, E., 2017. Degradación de la madera al exterior fuera de contacto con el suelo: Efecto del clima y de la especie. Comunicación oral en el 7º Congreso Forestal Español. Plasencia, Cáceres, 26-30 de junio de 2017.
  - 2.6. Galván, J., Acuña, L., Conde, M., Conde, M., Fernández-Golfín, J.I., 2017. Behavior of the wood outside the contact with the ground in Spain. Project BIA 2013-42434R. Comunicación en COST ACTION F9 1303 Workshop “Best practice and performance specification”. Universidad de Zagreb, Croacia, 6-7 de septiembre de 2017.
3. (Herramientas informáticas)
  - 3.1. Fernández-Golfín, J.I., Conde, M., Conde, M., 2017. Herramienta EXCEL para la asignación paramétrica de las clases de uso de la norma EN 335:2013.

Por todo lo anteriormente expuesto, los directores de la Tesis Doctoral abajo firmantes, consideran que el trabajo realizado reúne los requisitos establecidos para su presentación y defensa y, en consecuencia, autorizan la exposición y defensa pública de la Tesis Doctoral EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO FUNCIONAL DE LA MADERA MACIZA EN CONDICIONES DE USO EXTERIOR.

Por todo ello, se autoriza la presentación de la tesis doctoral.

**Córdoba, a 30 de mayo de 2023**

**Las/los directoras/es**

Fdo.:Dr. Juan I. Fernández-Golfín Seco  
Dra. Marta Conde García

*A mi familia y mis directores*



# ABREVIATURAS

---

AEMET	Agencia Estatal de Meteorología
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
AI	Índice de aridez de Martonne
AS	Australian Standard
BNC	Relativo a conectores tipo “ <i>Bayonet Neill-Concelman</i> ”
CEN	Comité Europeo de Normalización
CEN/TC	Comité técnico del CEN
CHE	Comité Europeo de Homologación
CHMED	Media anual de humedad de equilibrio de la madera
CIB	International Council for Research and Innovation in Building and Construction
CU	Clase de Uso
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
$D_{crit}$	Dosis crítica de degradación
$D_{EX}$	Dosis de exposición
$D_{RD}$	Dosis de resistencia de diseño
DB-SEM	Documento Básico Seguridad Estructural madera
EMC	Contenido de humedad de equilibrio
HR	Humedad relativa
I	Número medio mensual de horas de insolación
$I_{Sk}$	Índice característico de exposición
$I_{SO}$	Índice básico de exposición
INIA	Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria
ISO	Organization for Standardization
ISO/TC	Organization for Standardization. Timber Structures
IRG	International Research Group on Wood Protection
$k_{wa}$	Factor de especie
$k_{inh}$	Factor de tratamiento
NEIKER	Instituto Vasco de Investigación y Desarrollo Agrario, S.A.
MC	Contenido de humedad
$MC_{MED}$	Contenido de humedad medio anual
$MC_{MES}$	Contenido de humedad medio mensual
MCMAX	Contenido de humedad promedio mensual máximo
MCMIN	Contenido de humedad promedio mensual mínimo
ML	Modelo logístico
MRD	Mould Resistance Design



RDA	Riesgo de Deformación y Agrietamiento
RTD	Sensor resistivo “ <i>Resistance Temperature Detector</i> ”
SML	Modelo logístico simplificado
SCI	Índice de Sheffer
SCI2	Índice de Sheffer modificado
SCS	Severidad climática de verano
TAV	Temperatura media mensual del aire
WI	Índice de calentamiento de Hasegawa
WCS	Severidad climática de invierno
WPC	Compuestos madera-plástico

# ÍNDICE

---

<b>Índice</b>	ix
<b>Índice de Figuras</b>	xi
<b>Índice de Tablas</b>	xiii
<b>Resumen</b>	xv
<b>Abstract</b>	xvii
<b>1. Introducción</b>	1
<b>2. Objetivos</b>	5
<b>3. Estado del arte</b>	9
3.1. Análisis general	9
3.2. Contribución española al estado del arte	30
<b>4. Resumen global de resultados</b>	37
4.1. Optimización de los sistemas de monitorización del clima del material	37
4.1.1. Introducción	37
4.1.2. Contribución al estado del arte	40
4.1.3. Resumen de los trabajos	40
4.1.4. Contribución del candidato	45
4.1.5. Artículos y contribuciones efectuadas	45
4.2. Caracterización relativa del riesgo de pudrición empleando el índice climático de Scheffer	47
4.2.1. Introducción	47
4.2.2. Contribución al estado del arte	48
4.2.3. Resumen de los trabajos	48
4.2.4. Contribución del candidato	58
4.2.5. Artículos y contribuciones efectuadas	58
4.3. Caracterización del efecto de la especie en la resistencia biológica de la madera	61
4.3.1. Introducción	61
4.3.2. Contribución al estado del arte	61
4.3.3. Resumen de los trabajos	64
4.3.4. Contribución del candidato	75
4.3.5. Artículos y contribuciones efectuadas	75
4.4. Caracterización del efecto del diseño constructivo en la evaluación de la exposición de la madera	77
4.4.1. Introducción	77
4.4.2. Contribución al estado del arte	78
4.4.3. Resumen de los trabajos	83
4.4.4. Contribución del candidato	98
4.4.5. Artículos y contribuciones efectuadas	99
<b>5. Contribución del candidato</b>	101

<b>6. Conclusiones</b>	105
6.1. Conclusiones generales	105
6.2. Trabajos futuros	105
<b>7. Bibliografía</b>	107

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. Relación entre variables indirectas, directas y pudrición.....	11
Figura 2. Índices relativos de riesgo europeos, respecto de la estación de Uppsala.....	16
Figura 3. Mapas de riesgo relativo de pudrición en Europa, calculados mediante los modelos Logístico Simplificado (D1) y Logístico (D2) .....	17
Figura 4. Esquema de la metodología de obtención de índices relativos de exposición por localidad. ....	18
Figura 5. Dispositivo de ensayo “tipo” .....	20
Figura 6. Mapa de riesgo relativo de pudrición en Europa, calculado mediante el índice Scheffer.....	23
Figura 7. Mapa de riesgo de pudrición en Europa, según el valor absoluto del índice Scheffer.....	24
Figura 8. Relación entre la dosis de degradación calculada con el Modelo (I) <i>dosis-respuesta</i> y el nivel de pudrición evaluado según la norma EN 252:1989.....	27
Figura 9. Ubicación de los dispositivos experimentales .....	31
Figura 10. Detalle de la herramienta de asignación de clases de uso.....	35
Figura 11. Probetas de ensayo utilizadas en el estudio .....	41
Figura 12. Equipos de medida de la resistencia eléctrica.....	42
Figura 13. Detalle de la caja y cables de conexión del emulador al xilohigrómetro en verificación/calibración.....	45
Figura 14. Detalle de dispositivo experimental (Madrid). ....	50
Figura 15. Clasificación territorial del riesgo de pudrición en función del valor del índice Scheffer tradicional y ubicación de los dispositivos experimentales .....	55
Figura 16. Clasificación territorial del riesgo de pudrición en las Islas Canarias en función del valor del índice Scheffer tradicional .....	56
Figura 17. Evolución del MC de la madera de <i>Picea abies</i> en la estación de Vitoria .....	56
Figura 18. Corte transversal de las muestras de pino silvestre (PS) y radiata (PR) en las distintas ubicaciones.....	66
Figura 19. Comportamiento a la sorción de los pinos silvestre y radiata en Asturias y Vitoria (izqda.) y el resto de estaciones (dcha.) .....	67
Figura 20. Detalle de cámara climática con dispositivo de lluvia artificial.....	67
Figura 21. Comportamiento a la sorción observado según especie y tipo de aserrado..	74
Figura 22. Vista general del dispositivo de ensayo .....	85
Figura 23. (a) Evolución con el tiempo del MC medio del sensor 4 (MC4AV), del número total de días de lluvia (Nt) y del número de días con lluvia de más de 5 mm (N50).....	88
Figura 23. (b) Evolución con el tiempo del MC medio del sensor 4 (MC4AV) y de la precipitación total (Pt/10). ....	88
Figura 24. Representación gráfica de la media mensual del número de días con MC≥ 18% (N18), 22% (N22) y 25% (N25), por sensor (MCX). ....	90



# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Agentes de la degradación de la madera para todos los materiales de construcción .....	1
Tabla 2. Valores de $k_{wa}$ y $k_{inh}$ propuestos por Isaksson <i>et al.</i> (2015) .....	29
Tabla 3. Criterio de conversión del valor del índice Scheffer en valor del índice de exposición básica ( $I_{so}$ ) .....	33
Tabla 4. Valores del índice de exposición básica a emplear en elementos ubicados en el interior de edificios dotados de envolvente térmica en función de su Clase de Higrometría interior .....	34
Tabla 5. Criterios de asignación de clases de uso en función del valor calculado del índice característico de exposición .....	35
Tabla 6. Coeficientes de regresión del modelo $\text{Log}[\text{Log}(R)+1]=a \cdot h+b$ .....	43
Tabla 7. Valores de la humedad emulada en función de la especie elegida, del color del terminal y de la dirección de medida del xilohigrómetro para el que se desea verificar/calibrar su medida .....	44
Tabla 8. Clasificación del riesgo de pudrición en función del valor del índice Scheffer modificado .....	48
Tabla 9. Ubicación y datos de los dispositivos experimentales .....	50
Tabla 10. Datos históricos para las capitales de provincia (periodo 1971-2000).....	52
Tabla 11. Criterio de clasificación del riesgo de pudrición en función del valor del índice Scheffer modificado (SCI2) .....	57
Tabla 12. Valores de $k_{wa}$ y $k_{inh}$ propuestos por Isaksson <i>et al</i> (2015).....	62
Tabla 13. Valores de $k_{wa}$ y $k_{inh}$ propuestos por Humar <i>et al</i> (2019) .....	63
Tabla 14. Clasificación de las fendas según ISO 4628-4 .....	65
Tabla 15. Clasificación de la pudrición observada, de acuerdo con la norma EN 252:2015 .....	65
Tabla 16. Propiedades físicas de la madera que afectan a su comportamiento higroscópico .....	66
Tabla 17. Resumen de datos anuales de clima meteorológico y de material, agrupados por localidad y especie .....	69
Tabla 18. Resumen de datos climáticos, meteorológicos y de material, para el conjunto de los tres años analizados (2016, 2017, 2018) .....	71
Tabla 19. Valores de $k_{wa}$ propuestos para las especies en estudio .....	73
Tabla 20. Distribución del número de días con MC mayor que un umbral en función de la posición del detector y del tamaño de alero considerando un tiempo total de exposición de 1145 días .....	78
Tabla 21. Relación entre el detalle “i” y el detalle de referencia determinado como la media de ratios .....	81
Tabla 22. % de días con medidas del $MC \geq 25\%$ en suelos de madera sin tratar .....	82
Tabla 23. Asignación del índice de exposición básico en función del MC .....	86
Tabla 24. Criterios para la asignación de la clase de uso .....	86
Tabla 25. Resumen de la media mensual, valores máximo y mínimo del MC por sensor, valor medio del contenido de humedad de equilibrio (EMC) y de los valores climatológicos de la estación .....	87
Tabla 26. Resumen de los valores mensuales del número de días con $MC \geq 12\%$ (N12), 18% (N18), 22% (N22) o 25% (N25), por sensor (MCX) .....	89
Tabla 27. Diferencias de MC entre sensores (en %) .....	91
Tabla 28. Efectos individuales y aditivos de las diversas variables .....	92
Tabla 29. Cálculo de los valores de los índices anuales, de los factores de diseño y clases de uso asignadas .....	93



# RESUMEN

---

Desde las primeras décadas del siglo XXI, la madera está ocupando una mayor presencia en el sector de la construcción, en parte, debido al gran elenco de productos innovadores en base madera desarrollados por la industria, tales como el tablero contralaminado, la madera microlaminada, los tableros mixtos y la madera laminada, entre otros. Por otra parte, la creciente demanda que experimenta la madera por la mejora de la sostenibilidad en el sector conduce a un aumento en el empleo de materiales naturales, renovables y mejor adaptados al uso, que ayudan a reducir la huella ambiental del proceso edificatorio. Se observa en muchos casos que la madera ha sido incorporada a las diferentes soluciones constructivas con un escaso conocimiento del material, empleando para ello las mismas reglas utilizadas con el hormigón, el acero o los materiales cerámicos. La carencia de diseños específicos para las soluciones constructivas con madera ha puesto en riesgo, en muchos casos, la durabilidad de las soluciones adoptadas, lo que ha conducido a rehabilitaciones tempranas, con el consiguiente consumo de recursos y generación de impactos ambientales.

La presente Tesis Doctoral recoge los principales resultados de la investigación sobre la caracterización del comportamiento funcional de la madera en condiciones de uso exterior, por ser la situación que puede plantear algún tipo de restricción en la durabilidad de los productos y soluciones constructivas basados en la madera.

La primera de las líneas de investigación de este trabajo versa sobre la mejora de los sistemas de monitorización del clima del material, necesarios para contar con datos de calidad sobre la interacción clima geográfico-clima del material, se relacionó la resistencia eléctrica medida con xilohigrómetros de resistencia y el contenido de humedad de diferentes maderas. Las curvas de calibración obtenidas para las maderas más comunes para el mercado español pueden ser empleadas para estimar, de forma no destructiva, el contenido de humedad a partir de la medición de su resistencia eléctrica. Estas curvas son de interés para su empleo en los aparatos de medida de tipo portátil y en los sistemas de monitorización continua de la evolución del contenido de humedad de maderas expuestas a la acción del clima exterior, considerando además el efecto de determinadas variables de diseño.

En una segunda línea se aborda la cuantificación y modelización del riesgo de pudrición de la madera a nivel nacional, en función de las condiciones climáticas de entorno empleando el índice climático de Scheffer, en contraposición de la aproximación noreuropea que se basa en modelos *dosis-respuesta*. Además, se calculan valores del índice de Scheffer modificado, considerando días sin lluvia –pero con condensación–, el riesgo de degradación física y dimensional de la madera y los índices de severidad climática de verano e invierno. Los resultados indicaron que el riesgo de pudrición, evaluado en función del valor del índice Scheffer, está regido fundamentalmente por la severidad climática estival (SCSI) en las zonas costeras y por las severidades tanto de verano como de invierno (WCSI) en las zonas del interior, siendo el valor relativo de la insolación la variable con mayor efecto significativo, tanto en verano como en invierno. Se destaca la novedad de evaluar el efecto de las condensaciones sobre el riesgo de pudrición, lo cual permite proporcionar una nueva expresión para el cálculo del índice Scheffer y concluir que la presencia frecuente de condensación es un factor agravante y, por tanto, esta variable meteorológica debe ser considerada en el cálculo del riesgo de pudrición.

Un tercer trabajo aborda el efecto de la especie en la resistencia biológica de la madera. Mediante un amplio dispositivo experimental instalado en distintas ubicaciones del territorio nacional, se obtiene la evolución del clima de diferentes especies en función del clima meteorológico exterior. Los datos analizados permitieron mostrar que para las especies de frondosas incluidas en el estudio, existe un claro efecto de la especie en el



riesgo de pudrición; sin embargo, no ocurre lo mismo para las especies de coníferas analizadas, siendo el comportamiento muy similar entre ellas.

Finalmente, en la presente Tesis Doctoral se incluye el estudio sobre el efecto del diseño constructivo en la evaluación de la exposición de la madera en condiciones climáticas continentales. Mediante un dispositivo experimental ubicado en Madrid (España) se analiza la evolución del contenido de humedad de la madera afectado por diferentes condiciones de diseño durante un período de tres años. En concreto, se evalúa el efecto de la protección por aleros, la separación de los pilares respecto del suelo y la disposición vertical u horizontal de los elementos de madera sobre la evolución del contenido de humedad y el riesgo de pudrición, verificando la existencia de un efecto significativo.

Los cuatro estudios incorporados en esta Tesis Doctoral permiten avanzar en el conocimiento del efecto de los climas nacionales, de las especies de madera y del diseño constructivo en el riesgo de pudrición de la madera en España. Se avanza además en el conocimiento sobre la forma de cuantificar este riesgo en función de la localidad geográfica considerada y la mejor forma de medir el contenido de humedad que, junto con la temperatura, son las variables que guardan una relación más estrecha con la cinética de las degradaciones por pudrición.

# ABSTRACT

---

Since early decades of 21st century, wood has gained a stronger presence in construction sector, partly due to the important range of innovative wood-based products as CLT, LVL and SIP panels; glued laminated timber, among others. Furthermore, the growing demand of wood as a result of its contribution to the improvement of sustainability of that sector leads to an increase in the use of natural and renewable materials which are better adapted to that use and help reducing the environmental footprint of the building process. It is often observed that wood has been incorporated into diverse constructive solutions under a scarce knowledge of the material and following the same criteria used with concrete, steel or ceramic materials. Shortage of specific designs for wood-based constructive solutions has often threatened the durability of adopted solutions which has led to early rehabilitation, with the consequent consumption of resources and generation of environmental impacts.

This Doctoral Thesis collects main results of the research on the characterization of the functional behaviour of wood in conditions of outdoor use, as it is the main situation that may involve some type of restriction in the durability of wood-based products and constructive solutions.

The first target in this work was the improvement of material climate monitoring systems, in order to obtain high-quality data about interaction between geographical climate and material climate, electrical resistance measured with a resistance xylohygrometer and moisture content of different woods was related. The calibration curves obtained for the most important woods for the Spanish market can be used to estimate, in a non-destructive way, the wood moisture content through the measurement of the electrical resistance. The interest in these curves lays on the possibility of using portable measuring devices and continuous monitoring systems of the evolution of the moisture content of wood exposed to the action of the outdoor climate, while considering the effect of certain design variables.

In the second target, the quantification and modelling of the risk of wood decay, at national level, is addressed, according to climatic conditions in the environment by using the Scheffer climatic index, in opposition to the northeuropean approach based on dose-response models. In addition, values for the modified Scheffer index have been calculated, considering non-raining days – but with condensation-, wood physical and dimensional degradation risk and severity summer and winter indexes. Results indicates that decay risk, according to Scheffer index, is mainly governed by summer climatic severity (SCSI) in coastal areas and by summer and winter severities (WCSI) in continental areas, being the insolation relative value the variable with a higher significant effect both in summer and winter. The novelty of evaluating the effect of condensation on decay risk has to be highlighted, which allows to provide a new expression to calculate the Scheffer index and conclude that the frequent presence of condensation is an aggravating factor and, consequently, this meteorological variable must be taken into consideration in rot risk calculation.

A third target addresses the effect of the specie variable in the biological wood resistance. Through a large experimental device installed in different locations of the national territory, the evolution of the climate of different wood species is obtained depending on the external meteorological climate. Analysed data allowed to conclude that there is a clear species effect on decay risk for the hardwood species included in the study; however, it is not the case with considered conifer species, which have a similar behaviour among them.

Finally, this Doctoral Thesis includes a study on the effect of constructive design on the assessment of wood exposition to continental climatic conditions. Using an experimental device located in Madrid (Spain), the evolution of the moisture content of different elements affected by different design conditions is analysed over a period of three years. Specifically the effect of the protection by eaves, the separation of the pillars with respect

to the ground and the vertical or horizontal arrangement of the timber elements on the evolution of moisture content and the risk of decay are evaluated, verifying the existence of a significant effect.

The four studies included in this Doctoral Thesis enable advancement in knowledge of the effect of national climates, wood species and construction design on the risk of wood decay in Spain. Progress is also being made in the knowledge of how to quantify this risk on the basis of the geographical location considered and the best way to measure the moisture content in an accurate way, which, together with temperature, are the variables that have a closer relationship with the kinetics of decay.

# 1. INTRODUCCIÓN

El concepto de durabilidad de la madera ha sido habitualmente reducido a la relación del material con los hongos e insectos que la afectaban, olvidando que la madera, como los restantes materiales de construcción y decoración, están también sujetos a procesos de degradación de naturaleza física, química y mecánica durante el tiempo durante el cual permanecen en servicio. Es, por ello, que una gran parte de los manuales, publicaciones e incluso normas que versan sobre la durabilidad y la protección de la madera, se limitan a un análisis de los agentes biológicos de la degradación y a la mejor forma de prevenir o corregir su acción.

Este gran reduccionismo ha estado vigente hasta hace recientes fechas en las que el concepto de sostenibilidad aplicado a los materiales, soluciones constructivas y edificios, impulsado por el Reglamento de Productos de la Construcción, regulaciones ambientales diversas (entre ellas la Directiva de Biocidas) y, en última instancia, el Documento Básico SE-M Seguridad Estructural Madera del Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Fomento, 2009), han incorporado una nueva forma de mirar y evaluar la aptitud al uso y la durabilidad de la madera y de sus productos derivados (Fernández-Golfín y Troya, 2014).

A Frohndorsff y Masters (1980) (Tabla 1) [actualizado por Fernández-Golfín y Troya, 2014] se les debe el más completo análisis sobre los factores de la degradación que pueden afectar al comportamiento de la madera.

Tabla 1. Agentes de la degradación de la madera (Frohndorsff y Masters, 1980) para todos los materiales de construcción.

<b>I.- Agentes atmosféricos</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Radiación<ul style="list-style-type: none"><li>• Solar</li><li>• Nuclear</li><li>• Térmica</li></ul></li><li>• Temperatura</li><li>• Agua<ul style="list-style-type: none"><li>• Sólida (nieve, hielo)</li><li>• Líquida (lluvia, condensaciones)</li><li>• Vapor (humedad relativa)</li></ul></li><li>• Constituyentes normales del aire<ul style="list-style-type: none"><li>• Gases (óxidos de nitrógeno, sulfuros)</li><li>• Nieblas (salinas, ácidas)</li><li>• Partículas (arena, polvo)</li><li>• Lluvias ácidas</li></ul></li><li>• Ciclos de hielo-deshielo</li><li>• Viento</li></ul>	<b>II.- Agentes biológicos (bióticos)</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Insectos</li><li>• Microorganismos</li><li>• Hongos</li></ul> <b>III.- Tensión</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Mantenida</li><li>• Alternante</li></ul> <b>IV.- Incompatibilidades</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Químicas</li><li>• Físicas</li></ul> <b>V.- Uso</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Diseño</li><li>• Métodos de instalación</li><li>• Métodos de mantenimiento</li><li>• Desgaste</li><li>• Abuso de uso</li></ul>
---	---

No todos estos agentes afectan al material de igual forma y en todas las condiciones. De esta forma se sabe que las nieblas salinas y el contacto directo con la sal no afecta gravemente al material, pero sí el resto de los agentes atmosféricos relacionados con el agua (lluvia, nieve, hielo), especialmente en combinación con la temperatura, si bien la temperatura por sí sola no afecta a las propiedades de la madera si se encuentra dentro de los límites habituales de servicio. Junto a estos agentes de degradación de la madera existen otros factores propios del material que al interrelacionarse con ellos pueden traer consigo que la cinética de la degradación sea distinta. Entre estos factores se encuentran la propia estructura de la madera, su comportamiento higroscópico, su anisotropía, su composición química, etc. Todo esto hace que no se pueda hablar propiamente de la durabilidad de la madera sino de las maderas y sus productos derivados y bajo distintas situaciones o escenarios, ya que al tener cada una de ellas una estructura, una

composición química y un comportamiento higroscópico propios hacen que la cinética de la degradación sea muy variable. De todo lo anterior puede inferirse la gravedad que para la correcta comprensión sobre el funcionamiento del material supone adoptar una visión tan reduccionista como puede ser la más arriba mencionada, considerar que la durabilidad de la madera sólo es debida a la acción de los hongos e insectos.

En una sociedad como la actual, en la que las exigencias medioambientales son crecientes, especialmente sobre uno de los grandes sectores de actividad generadores de huella ecológica como es el de la construcción, la madera puede jugar un papel muy destacado, pues es el único material de construcción que puede aportar créditos de carbono al proceso constructivo. Pero esta ventaja inicial puede ser anulada, e incluso revertida, si las soluciones constructivas con madera y derivados no son capaces de durar lo exigido en proyecto, porque obligaría a periódicas labores de rehabilitación que al generar huella ecológica podrían llegar a consumir toda la aportación positiva inicial.

El interés sobre la durabilidad de la madera, sus derivados y los sistemas constructivos con ellos elaborados ha venido creciendo de la mano de las exigencias medioambientales de la sociedad y la técnica constructiva. Con la irrupción del ecologismo a finales de los 70 y comienzos de los 80, en el panorama político occidental se empieza a generar una nueva conciencia medioambiental que impacta con fuerza en la sociedad y en el debate político, lo que lleva a un creciente interés sobre aspectos como la contaminación (en sentido amplio) y el buen uso de los recursos naturales y, en general, por el respeto medioambiental. El informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo "Nuestro futuro común" (Naciones Unidas 1987), denominado coloquialmente como informe Brundtland, recoge las conclusiones fruto del amplio e intenso debate mantenido a este respecto a nivel internacional desde comienzos de la década de los 80.

En este contexto surge el interés por evaluar y reducir la huella ecológica dejada por diversos sectores, entre ellos el de la construcción. No es, por tanto, extraño que en este periodo se relance el interés por el desarrollo de herramientas como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), cuyo origen se produjo en los años 60 del pasado siglo en Estados Unidos. Para el correcto empleo de esta metodología en el ámbito de la construcción se requiere el conocimiento de todos los aspectos relacionados con la durabilidad de los materiales y de las soluciones constructivas. Este debate medioambientalista de los años 80 también coincide en el tiempo con el desarrollo de los códigos de práctica constructiva de naturaleza prestacional, en los que los materiales y soluciones constructivas deben cumplir con unas determinadas prestaciones, motivo por lo cual se abre el debate sobre las prestaciones que deben hacer frente los materiales en las distintas condiciones de uso. En este entorno temporal surgen los trabajos de Frohndorsff y Masters (1980) y los del Comité Europeo de Normalización CEN/TC 38 sobre la definición de las clases de riesgo, - posteriormente clases de uso-, que venían a materializar en forma de norma europea una decisión previa tomada al respecto en 1981 por el Comité Europeo de Homologación (CEH) y publicada en 1984 (citado en el preámbulo de la norma EN 335-1:2006). Este desarrollo normativo diseñado con el fin de definir las condiciones de uso a las que la madera ha de hacer frente durante su vida en servicio fue posteriormente trasladado internacionalmente al *International Organization for Standardization* (ISO), quien tras un largo debate interno en el comité ISO/TC 165 *Timber structures* acabó aprobando la norma ISO 21887 en el año 2005 (ISO 21887, 2009) tras largos años de debates. En este mismo esfuerzo por definir las condiciones de uso, las prestaciones exigibles y el comportamiento esperado de los productos en base madera se encuadran normas como la EN 350 (parte 1 y 2), que en 1995 tuvo su primera versión (EN 350-1 y 2, 1995) y permite, entre otros aspectos, clasificar la durabilidad natural de cada madera.

Los grandes impulsores del cambio de paradigma en cuanto a la forma de tratar los aspectos relacionados con la madera en general, o su durabilidad en particular, surgieron en el *International Council for Research and Innovation in Building and Construction* (CIB) y el *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (CSIRO). Con anterioridad a 1970 (Leicester y Barnacle, 1990), las reglas en los códigos de diseño

estructural se basaron en gran medida en seguir la experiencia pasada. De esta forma, cuando se producía un cambio en el escenario estructural (como la aparición de nuevos materiales o cargas), generalmente se producía un desacuerdo entre los expertos sobre qué nuevas reglas de diseño debían aplicarse en cada caso. La alternativa a esta situación vino desde el CIB, quien en 1983 presentó su propuesta de Código de diseño estructural en madera, que tenía en cuenta criterios probabilísticos para la gestión de riesgos e incorporaba ya conceptos como el de los estados límite de servicio.

El primer organismo que trata de incorporar este nuevo planteamiento en su cuerpo normativo fue el CSIRO australiano y así, Leicester (1999) desarrolló varios modelos analíticos y de predicción del desempeño estructural, necesarios para la implantación del nuevo paradigma. Entre sus trabajos figura el desarrollo de modelos para predecir fallos estructurales debido a la deformación, a la fractura, al ataque por fuego o la degradación del material; así como modelos de respuesta y comportamiento humanos. Esta estrategia, que se demostró válida y fiable, fue incorporada en la redacción de la primera versión (1988) del código de construcción australiano (AS 1720.1, 1998), el cual fue el primero en incorporar el concepto de los estados límites de diseño. Con posterioridad esta visión fue también incorporada en innumerables códigos de práctica constructiva nacionales, entre los que cabe citar nuestro Eurocódigo 5, publicado por primera vez como norma experimental (ENV 1995) en 1993 (ENV 1995-1-1:1993). La versión final del Eurocódigo 5 vio la luz en 2004 y fue adoptada por todos los estados miembros en 2010, si bien España lo hizo en 2016 (EN 1995-1-1:2016).

Las preocupaciones ambientales, de salud y seguridad han llevado a muchos gobiernos a regular el uso de protectores químicos de la madera. Las familias más antiguas de productos (p. ej. sales CCA) que habían servido bien a la industria durante décadas, fueron retiradas del mercado en algunas áreas geográficas bajo la influencia de tales regulaciones y sustituidas por nuevas formulaciones, en general menos eficaces. Entre estas normativas es necesario señalar muy especialmente la Directiva 98/8/CE relativa a biocidas, publicada en 1998 (DOUE-L-1998-80690) y posteriormente modificada por el Reglamento (UE) nº 528/2012, que establece la creación de un Registro único y un estricto sistema de aprobación de las sustancias activas. Es precisamente este carácter restrictivo hacia el uso de protectores químicos de la madera el que ha hecho ganar interés sobre un aspecto casi hasta entonces olvidado: el diseño constructivo.

Con la entrada en vigor de las restrictivas normativas medioambientales que actualmente gravitan sobre el sector de la edificación, una de las preguntas más importantes para los prescriptores y usuarios de productos de madera es "¿cuánto tiempo durarán en servicio?". De la respuesta que se dé a esta pregunta puede depender la calificación ambiental de un producto de madera. En la actualidad, la durabilidad de los productos de madera puede ser suficiente para ciertos usos temporales como los encofrados, las aplicaciones de interior, incluso algunas de carpintería exterior. No sucede lo mismo en el caso de los postes de madera para telecomunicaciones y distribución de electricidad o en el de las estructuras de madera para edificación, que deben tener una vida útil medida en décadas. Así, en el sector de la edificación se ha establecido que la vida útil requerida para los componentes de un edificio debe ser de 50 años (Código Técnico de la Edificación).

La durabilidad de los componentes y materiales presentes en una edificación depende en gran medida del microclima al que se enfrentan en servicio. Por tanto, la predicción de la durabilidad requiere el conocimiento de dicho microclima, lo que obliga a conocer aspectos tales como el macroclima propio de la localidad geográfica en la que la edificación se sitúa, el mesoclima propio de la ubicación concreta en la que el edificio se ubica y los aspectos del diseño que hacen que el clima en contacto directo con el material (microclima) sea como es.

El conocimiento sobre el comportamiento de los productos de la madera en el interior de los edificios hace que sea fácil de establecer las bases de un modelo probabilístico basado en el empleo de límites de servicio cuando la madera es empleada al interior de edificios

dotados de envolvente térmica e incluso sin ella, pero no sometidos a la presencia de condensaciones. No ocurre lo mismo cuando se trata de establecer las bases del cálculo para el diseño de soluciones al exterior, en las que hace acto de presencia la lluvia. En este último caso son muchos los factores climáticos, de comportamiento del material y de diseño que es necesario integrar para conocer tanto las acciones que gravitan sobre el material y que le pueden llevar a su degradación como la resistencia biológica que el material realmente tiene en servicio.

## 2. OBJETIVOS

---

### OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de esta Tesis es poner a punto un sistema objetivo y paramétrico a nivel nacional para evaluar el riesgo de pudrición de un elemento de madera sometido a la acción del clima exterior.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos que se plantean son los siguientes:

1. Optimizar los sistemas de monitorización del clima del material. Dentro de este objetivo se consideran dos subobjetivos:
  - 1.1. Generar datos de la evolución del clima del material en función de la especie y de la localidad mediante el diseño y el establecimiento de un sistema experimental.
  - 1.2. Obtener curvas de calibración que permitan relacionar el contenido de humedad de la madera con la resistencia eléctrica.
2. Caracterizar el riesgo relativo de pudrición a nivel nacional empleando el índice climático de Scheffer.
3. Caracterizar el efecto de la especie en la resistencia biológica de la madera.
4. Caracterizar el efecto del diseño constructivo en la evaluación de la exposición de la madera en condiciones climáticas continentales.

### PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO

Según los objetivos específicos, la Tesis se estructura de la siguiente forma:

1. Establecimiento de un sistema experimental compuesto por muestras de madera seleccionadas y ubicadas en las zonas climáticas más representativas a nivel nacional para la generación de datos de evolución del clima del material en función de la especie y de la localidad, que permitan caracterizar el proceso de pudrición de la madera sometida al clima exterior. Este primer trabajo se planifica en dos partes para alcanzar los dos subobjetivos planteados:

#### 1.1. Puesta en marcha de dispositivos de ensayo

Como estrategia básica para poder disponer de datos sobre el comportamiento de la madera al exterior, tanto a corto como a medio y largo plazo, se han diseñado y establecido los dispositivos experimentales adecuados para tal fin, ubicándolos en localidades cuyo clima sea representativo de los principales climas peninsulares.

A estos dispositivos se incorporaron las especies y tipos de madera habitualmente presentes en el mercado de la construcción nacional. Todas estas piezas fueron montadas sobre un bastidor que las sobre eleva del suelo la distancia suficiente como para asegurar que el contenido de humedad de las piezas de madera no se vea afectado por el salpicado del agua de lluvia, la acumulación de nieve o la existencia de vegetación. En el caso de los dispositivos diseñados para la presente Tesis se consideró una altura de 70 cm. Igualmente y para asegurar la perfecta ventilación de cada pieza de madera por sus cuatro caras, las tablas se dispusieron separadas entre sí 20 cm.

Tanto la temperatura de la madera en cada ubicación como el contenido de humedad de todas las piezas de madera de cada dispositivo fueron monitorizados de forma continua para poder reproducir el clima del material durante todo el tiempo que dure la exposición. Dentro de cada localidad seleccionada, los dispositivos se ubicaron en



lugares donde no existían sombras ni protecciones de ningún tipo frente a la acción del clima exterior.

El tamaño de las piezas fue el sugerido en la acción *COST Action FP1303* (20x100x750 mm<sup>3</sup>), lo que permite la intercomparación de resultados con los obtenidos en otras localidades europeas donde se desplegaron dispositivos similares como parte de una estrategia común para desarrollar modelos de comportamiento y permitir la puesta en marcha de una estrategia efectiva de parametrización de la durabilidad de la madera expuesta al clima exterior fuera del contacto con el suelo.

Los dispositivos de ensayo se han mantenido en las ubicaciones seleccionadas hasta el momento en el que todas sus piezas de madera presenten signos de pudrición de nivel 1 según la norma EN 252:2015.

El presente subobjetivo se desarrolló mediante acciones a corto, medio y largo plazo:

1. Acciones a corto plazo
  - 1.1. Diseñar y construir los dispositivos experimentales.
  - 1.2. Seleccionar los lugares de despliegue y montaje de los mismos.
2. Acciones a medio plazo
  - 2.1. Monitorizar de forma continua la temperatura y el contenido de humedad de cada pieza de madera a partir del momento en el que las variables se hayan acomodado a la exposición.
  - 2.2. Monitorizar de forma periódica el estado de conservación de las piezas de madera, de acuerdo con lo establecido en la norma EN 252.
  - 2.3. Obtener datos climáticos (temperatura, humedad relativa y precipitación horaria) correspondientes a cada ubicación.
  - 2.4. Elaborar los informes y análisis periódicos sobre la evolución de las variables climáticas del material y del estado de conservación de los materiales expuestos.
  - 2.5. Analizar el grado de ajuste de los modelos predictivos de la degradación para aquellas piezas de madera que vayan alcanzando el límite de servicio establecido.
3. Acciones a largo plazo
  - 3.1. Mantener el proceso de monitorización climática y de la degradación hasta el momento en el que todas las piezas de madera instaladas en cada lugar hayan alcanzado un nivel de pudrición tipo 1 según la norma EN 252.
  - 3.2. Elaborar los informes y análisis finales sobre el grado de ajuste de los modelos predictivos de la pudrición y propuesta de cambios en los mismos.

Debido al largo plazo necesario para la ejecución de las acciones, en la presente tesis no se plantea como objetivo proponer modelos válidos para la caracterización de la degradación de la madera en los principales climas nacionales. No obstante, se contemplará en trabajos futuros.

#### 1.2. Optimización de los sistemas de monitorización del clima del material

Dada la necesidad de monitorizar el contenido de humedad de los distintos tipos de maderas que se exponen en cada dispositivo experimental y de evaluar dicha variable con precisión junto con la inexistencia de modelos precisos para el material expuesto, es un objetivo de este trabajo el obtener nuevas curvas de calibración que permitan relacionar el contenido de humedad de la madera, medido por el método gravimétrico de la norma EN 13183-1:2022, con la resistencia eléctrica. Con estas curvas se pretende estimar el valor del contenido de humedad de la madera a través de la

medición de la resistencia eléctrica de la misma. Se plantea como subobjetivo desarrollar estas curvas para las principales maderas presentes en el mercado nacional, así como estimar el valor del contenido de humedad con un error de estima máximo del  $\pm 1\%$ .

2. Puesta a punto de un sistema paramétrico y objetivo que permita cuantificar el riesgo de pudrición de la madera a nivel nacional empleando el índice climático de Scheffer (Scheffer, 1971).

Dado que en el horizonte temporal de esta Tesis no fue posible que todas las maderas expuestas en los distintos lugares alcanzaran el límite de servicio (nivel 1 de pudrición según EN 252) y que por tanto no fue posible aplicar y optimizar los modelos de dosis-respuesta existentes en la bibliografía, el objetivo de la Tesis se ajustó a realizar una caracterización relativa del riesgo de pudrición a nivel nacional empleando para ello el índice climático de Scheffer.

Como acciones para alcanzar este objetivo se plantean las siguientes:

1. Evaluar la aplicabilidad del índice climático de Scheffer a las condiciones climáticas nacionales y proponer, en su caso, modificaciones en el mismo.
  2. Establecer mapas de riesgo relativo para el territorio nacional.
  3. Identificar y evaluar el efecto de las variables climáticas influyentes en el nivel de riesgo.
3. Obtener datos de contenido de humedad a través de dispositivos experimentales instalados en distintas ubicaciones (enero de 2016) para caracterizar el efecto de la especie en el riesgo de pudrición de la madera a nivel nacional.

Para cumplir este objetivo se compararon el número de *días húmedos* a lo largo de tres años seguidos que presentan las distintas maderas. Un día se considera *húmedo* cuando el contenido de humedad de la madera supera un cierto umbral por encima del cual existe riesgo de actividad fúngica.

Como acciones de este objetivo se plantean las siguientes:

1. Determinar el valor del factor especie ( $k_{wa}$ ) para las principales especies de madera nacionales.
  2. Evaluar el efecto de las fendas en el comportamiento al exterior de las distintas especies de madera.
  3. Evaluar el efecto del tipo de aserrado en el comportamiento al exterior de las distintas especies de madera.
4. Obtener los valores de clima del material mediante un dispositivo experimental instalado en Madrid (marzo 2016) para determinar el efecto de determinadas variables de diseño en el riesgo de pudrición de la madera en condiciones climáticas continentales propias de la zona centro peninsular. Contrastar los valores obtenidos con los correspondientes a climas centroeuropeos.

Para cumplir este objetivo se compararon entre sí el número de *días húmedos* de los lugares próximos a cada diseño bajo evaluación. Este análisis comparativo se llevará a cabo durante un periodo de exposición de tres años.

Como acciones de este objetivo se plantean las siguientes:

1. Determinar el grado de protección introducido por los aleros.
2. Determinar el efecto de la distancia al suelo en el riesgo por exposición.
3. Determinar el efecto de la posición relativa de los elementos de madera (vertical vs. horizontal).
4. Determinar el efecto de las distintas variables climáticas en la evolución del riesgo (exposición).



## 3. ESTADO DEL ARTE

---

### 3.1. Análisis general

La durabilidad es uno de los aspectos más limitantes para el uso de madera en la construcción y su abordaje práctico exige el desarrollo de métodos objetivos y normalizados. La vida en servicio de los elementos de madera depende de ciertas propiedades intrínsecas del material, como su composición química y su dinámica ante los cambios de humedad en función de sus características estructurales, así como de las condiciones medioambientales en las que dichos elementos prestan servicio (Niklewsky *et al.*, 2021). Las variables medioambientales pueden ser subdivididas en indirectas y directas, si bien, a su vez, las directas dependen de las indirectas (Brischke *et al.*, 2006). Las variables directas incluyen el contenido de humedad y la temperatura de la madera, las cuales dependen de variables indirectas, tales como la precipitación, la temperatura del aire y los detalles de diseño.

El primer modelo predictivo del efecto de variables medioambientales de tipo indirecto, como son la precipitación y la temperatura, sobre la pudrición de la madera fue desarrollado por Scheffer (1971). Con posterioridad a este primer intento, de naturaleza totalmente empírica, de predicción del riesgo de pudrición de la madera en función de las condiciones de servicio, se han desarrollado numerosos modelos, ya de naturaleza más teórica, orientados hacia la predicción de la vida en servicio del material en función tanto de variables medioambientales directas como indirectas. El primer intento de establecimiento de un modelo de tipo teórico surge en Australia a mediados de los años 90 del siglo pasado, ante la necesidad de incorporar la durabilidad en su código de práctica constructiva. Para ello se puso en marcha un proyecto innovador denominado *Design for Durability*, cuyo objetivo primordial era modelizar el desarrollo de los hongos de pudrición y las termitas en función de diversas variables inherentes al material y al clima, como medio para desarrollar procedimientos de diseño y cálculo útiles para que el edificio y sus componentes pudieran funcionar con un nivel de confianza, de forma muy parecida a como se hace con el cálculo estructural. Una descripción del proyecto y sus objetivos puede ser leída en Foliente *et al.* (1999), para quien la idea de parametrizar la durabilidad fue propuesta por primera vez por Leicester y Barnacle (1990), y posteriormente ampliada por Stringer (1993).

En el trabajo de Leicester y Foliente (1999) se presentan las variables que tuvieron en cuenta en la construcción de dichos modelos, introduciéndose por primera vez el concepto de “tiempo de mojado” como variable fundamental para modelizar la pudrición de la madera. Los primeros modelos desarrollados en el seno de este proyecto fueron los debidos a Wang *et al.* (2008) y Nguyen *et al.* (2008) y están basados en la modelización de la profundización de la pudrición y en el establecimiento de un límite de diseño para la profundidad de la pudrición. Además, en Leicester *et al.* (2009) se recoge un resumen del procedimiento finalmente adoptado para el diseño estructural con madera en exposición al exterior fuera del contacto con el suelo.

A comienzos de los años 2000 en Europa, una restrictiva Directiva de Biocidas (Directiva 98/8/CE) y una creciente sensibilidad medioambiental en la sociedad en general y en el sector de la construcción en particular, trajeron consigo la necesidad de restringir el uso de protectores químicos preventivos a casos muy puntuales, lo que hacía que el diseño preventivo entrase en juego. Paralelamente, en esta época empezaron a aparecer numerosos trabajos sobre la modificación térmica y química de la estructura de la madera (acetilación, furfurilación), como medio de obtener una mayor resistencia natural en el material frente a la pudrición sin grandes impactos ambientales, así como sobre la utilización del diseño preventivo para evitar las condiciones de humedad en las que los agentes xilófagos más destructivos actúan.

Como continuación de los trabajos australianos, en la década 2000-2010 se desarrollaron en Europa algunos proyectos como el *Woodexter* (2007-2011) y el *WoodBuild* (2008-2013), que abordaron de forma decisiva la evaluación del diseño y la influencia de los factores que agravan o disminuyen el riesgo de la degradación de la madera en servicio. En dicha década se publicaron numerosos trabajos (Morris y Winandy, 2002; Marteinson, 2003; Elowson *et al.*, 2003; Hedley *et al.*, 2004; Leicester *et al.*, 2005; Rydell, 2005; Brischke *et al.*, 2006, 2008; Brischke y Rapp, 2008a, 2008b; Wang *et al.*, 2007, 2008; Ross Gobakken *et al.*, 2008; Van den Bulcke *et al.*, 2009; Viitanen *et al.*, 2009; Brischke *et al.*, 2010a, 2010b, 2010c) que buscaban explorar e impulsar procedimientos para el correcto diseño estructural con madera en concordancia con los conceptos establecidos en la norma ISO 13823 (2008). Más recientemente, en los trabajos publicados por Thelandersson *et al.* (2011), Issakson y Thelandersson (2013b) e Issakson *et al.* (2015), todos ellos empleando los resultados habidos en el seno de los Proyectos *Woodexter* y *Woodbuild*, se propusieron una serie de pautas prácticas a tener en cuenta en el diseño de edificios construidos con madera en lo que hace referencia a su durabilidad y vida en servicio. Estos autores propusieron en sus trabajos el empleo de un sistema de comprobación similar al utilizado en el cálculo estructural basado en el uso de la inequación siguiente:

$$\text{Exposición} \leq \text{Resistencia}$$

Esta inequación puede ser expresada de forma más comprensible de la siguiente forma (Alfredsen *et al.*, 2021, Brischke *et al.*, 2021a):

$$\text{Dosis de exposición } (D_{EX}) \leq \text{Dosis de resistencia } (D_{RD}) \quad [1]$$

De acuerdo con Marteinson (2003) era posible aplicar el método factorial de la norma ISO 15686-1 al cálculo de ambos miembros de la inequación [1], estableciendo valores básicos de exposición y/o resistencia independientes del material, valores que posteriormente debían ser corregidos mediante factores que tuvieran en cuenta los diferentes aspectos intervinientes relacionados tanto con el propio material (especies, dimensiones, tratamientos aplicados, tipo de material, etc.) como con el “clima” en el que trabaja el material, u otros aspectos relacionados con el diseño o con peligros asociados con el fallo del elemento en cuestión.

De acuerdo con Thelandersson *et al.* (2011), Issakson y Thelandersson (2013b), Issakson *et al.* (2015), y más recientemente Alfredsen *et al.* (2021) y Brischke *et al.* (2021a), en la inequación [1] la Dosis de exposición ( $D_{EX}$ ) ha de calcularse teniendo en cuenta la dosis básica de exposición climática de un elemento de madera correspondiente al lugar de estudio, calculada de acuerdo con los promedios diarios del clima material (temperatura y contenido de humedad), que posteriormente debía ser modificada tomando en consideración todos los factores que influyen en el clima material (condiciones de exposición local, orientación respecto de los vientos dominantes de lluvia, aleros, distancia al suelo, diseño de detalles constructivos, etc.). Análogamente, en la inequación [1] la dosis de resistencia de diseño del material ( $D_{RD}$ ) se ha de calcular considerando una dosis crítica de degradación ( $D_{crit}$ ) válida para todas las maderas, modificada mediante los factores que afectan a esta resistencia básica.

En la actualidad existe un proyecto de norma, la PNE-prEN 460: 2020, que considera los factores que pueden influir en la vida útil de un producto de madera en servicio. El principal fallo de la norma radica en la ausencia de métodos de ensayo aceptados para el cálculo de parte de estos factores. Un análisis sobre sus orígenes y conceptos puede ser leído en Suttie *et al.* (2014) y una revisión de las normas europeas relacionadas con la durabilidad y

el comportamiento en servicio queda recogido en Kutnik *et al.* (2014). Seguidamente se analiza por separado el estado actual del conocimiento sobre el cálculo de cada uno de los dos miembros de la inequación [1].

### A.- Cálculo del valor de la Dosis de exposición

Para el cálculo del valor característico de la Dosis de exposición, también conocido como índice característico de exposición ( $I_{sk}$ ) en la expresión [1], Thelandersson *et al.* (2011) propusieron la siguiente expresión:

$$I_{sk} = I_{s0} * k_{s1} * k_{s2} * k_{s3} * k_{s4} * C_a \quad [2]$$

En la expresión [2],  $I_{s0}$  representa el índice básico de exposición (dosis de degradación acumulada en un tiempo dado, normalmente un año), el cual debe definirse para cada lugar en función de la evolución anual esperada del clima del material (temperatura y contenido de humedad), los factores  $k_{si}$  tienen en cuenta aspectos de agravamiento o de reducción del riesgo en función de la mayor o menor exposición ( $k_{s1}$ ) y del efecto de variables del diseño ( $k_{s2} - k_{s4}$ ), siendo  $C_a$  el factor de calibración.

Para la determinación del índice básico de exposición se han seguido diversas aproximaciones, modelizando la cinética de la pudrición o mediante el empleo de índices climáticos.

#### 1. Modelizando la cinética de la pudrición

Existen dos aproximaciones distintas (Figura 1):

- Crear modelos que relacionen directamente las variables ambientales del entorno (temperatura, humedad relativa y precipitación) con la intensidad de los ataques, lo que resulta de una extrema complejidad.
- Crear modelos que relacionen las variables climáticas del material con la intensidad de los ataques, lo que exige el desarrollo de un modelo climático previo que permita obtener el clima del material en función de las variables climáticas del entorno. Esto hace que el proceso por este sistema sea un proceso en dos fases.

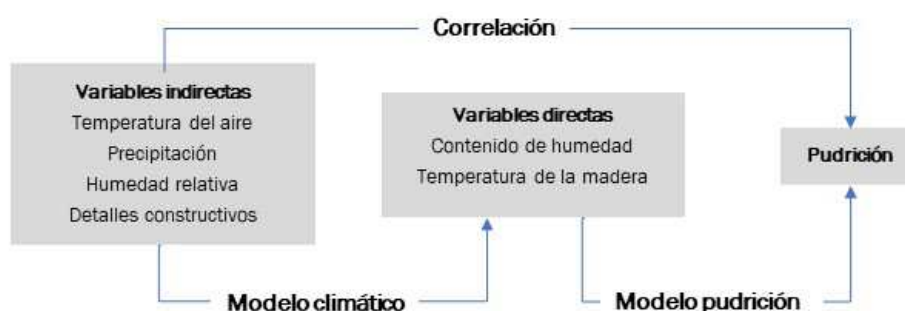


Figura 1. Relación entre variables indirectas, directas y pudrición (Niklewski *et al.*, 2021).

Entre los modelos basados en el empleo de variables climáticas del material es necesario citar en primer lugar a las funciones *dosis-respuesta*. Estas funciones tienen como objetivo establecer las cargas climáticas (dosis) que se van acumulando en el material con el tiempo, como consecuencia de la acción del clima del material.

Los modelos de dosis-respuesta fueron desarrollados por diversos autores (Brischke y Rapp, 2008; Isaksson y Thelandersson, 2013b; Brischke y Meyer-Veltrup, 2016), tomando como referencia el comportamiento de la madera dispuesta en dispositivos de ensayo ubicados al exterior durante largo tiempo. Todos estos modelos se basan en el empleo de las medidas tomadas de contenido de humedad y de temperatura de la madera, así como del estado de conservación del material, evaluado de acuerdo con la norma EN 252, la cual establece cinco niveles que van desde sana (0) a fallo (4) (Brischke y Selter, 2020).

La utilidad de los modelos dosis-respuesta radica en que conociendo el clima del material correspondiente a un lugar (bien medido directamente o estimado a través del uso de un modelo climático), con ellos sería posible determinar la dosis de degradación acumulada en el material anualmente y por comparación con la dosis crítica que lleva a la superación del límite de servicio, determinar la vida esperada en servicio de un determinado diseño y material (Meyer-Veltrup *et al.*, 2018). Otra utilidad de los modelos *dosis-respuesta* radica en que permiten establecer mapas zonales de riesgo, estimado este en función de la dosis anual acumulada en un año tipo, y con ello establecer riesgos relativos por amplias zonas del territorio europeo.

En lo que respecta a su desarrollo, los primeros en proponer funciones *dosis-respuesta* fueron Brischke y Rapp en 2008, quienes trabajando sobre albura de pino silvestre y duramen de abeto Douglas y haciendo uso de los datos generados en 23 dispositivos experimentales de doble capa ubicados en diferentes lugares de Europa (15 en Alemania, 3 en Gran Bretaña y ninguno en clima mediterráneo), en los que se monitoreaba de forma continua tanto la pudrición (de acuerdo con EN 252) como el contenido de humedad, propusieron un primer modelo en el que se calculaba la **dosis diaria de degradación del material (d)** a través del efecto multiplicativo de dos factores, la dosis diaria debida al efecto de la temperatura ( $d_T$ ) y la dosis diaria debida al efecto del contenido de humedad ( $d_{MC}$ ). Según este planteamiento, las dosis inducidas por efecto del contenido de humedad y de la temperatura son combinadas para generar una dosis diaria única que representa las condiciones para la pudrición de dicho día. La expresión [3] (Modelo I) siguiente refleja este planteamiento:

$$d = d_{MC} \cdot d_T \quad [3]$$

Posteriormente la suma de las dosis diarias durante un periodo temporal compuesto por N días da lugar a la dosis acumulada en dicho periodo:

$$d_N = \sum_{i=1}^N d_{MC}(MC_i) \cdot d_T(T_i) \quad [4]$$

Donde

$d_N$ : dosis acumulada durante N días,

$d_{MC}(MC_i)$ : dosis diaria relacionada con el contenido de humedad en el día "i" (MC).

$d_T(T_i)$ : dosis diaria relacionada con la temperatura en el día "i" (T)

Tanto  $d_{MC}$  como  $d_T$  toman un valor entre 0 y 1 representando el valor 1 la existencia de condiciones favorables para el desarrollo de los hongos de pudrición y son calculadas ambas mediante las siguientes expresiones:

$$d_{MC}(MC_i) = \begin{cases} 0 & \text{para } MC_i < 25\% \\ 6.75 \cdot 10^{-10} MC^5 - 3.75 \cdot 10^{-7} MC^4 + 7.18 \cdot 10^{-5} MC^3 - 7.22 \cdot 10^{-3} MC^2 + 0.34 MC - 4.98 & \text{para } MC_i \geq 25\% \end{cases} \quad [5]$$

$$d_T(T_i) = \begin{cases} 0 & \text{para } T_{min} < 0^\circ C \text{ ó } T_{max} \geq 40^\circ C \\ 1.8 \cdot 10^{-6} T^4 + 9.57 \cdot 10^{-5} T^3 - 1.55 \cdot 10^{-3} T^2 + 4.17 \cdot T & \text{para } T_{min} \geq 0^\circ C \text{ ó } T_{max} < 40^\circ C \end{cases} \quad [6]$$

Entre los valores cardinales mínimo (0°C) y máximo (40°C) por efecto de la temperatura (que ambos generan valores de  $d_T=0$ ) se empleó la regla de que, por cada 10°C de incremento en la temperatura, la actividad enzimática se incrementaba de 2 a 4 veces.

Posteriormente, estos mismos autores (Brischke y Rapp, 2010a) desarrollaron una formulación más avanzada de la expresión [3] para integrar el diferente impacto que tienen la temperatura y el contenido de humedad en la pudrición. De acuerdo con este criterio el Modelo I quedó expresado como sigue:

$$d = \frac{a \cdot d_t + d_{MC}}{a+1} \quad [7]$$

expresión que sustituiría a la [3] antes vista y que sería de aplicación solo si  $d_T$  y  $d_{MC}$  fueran ambos  $>0$  y si estas variables fueran calculadas según las expresiones [5] y [6], respectivamente. En la expresión [7] el factor “a” quedó establecido empíricamente en 3,2.

Este Modelo I fue empleado en un trabajo posterior (Brischke et al., 2013) en el que se analizó la influencia de diferentes variables de tipo constructivo (aleros, distancia al suelo, disposición vertical u horizontal, orientación e incluso especie) en las dosis acumuladas de diversos elementos de madera de Abeto rojo (*Picea abies*) durante un periodo de tres años, demostrando su aplicabilidad pero dejando la duda sobre su precisión hasta el momento en el que hicieran acto de presencia las pudriciones.

Estos mismos autores (Brischke y Rapp, 2010a; Brischke et al., 2011), propusieron un segundo modelo (Modelo II), aunque con su formulación genérica idéntica [4], establece unos intervalos de definición de las variables distintos, con lo que quedó establecido como sigue:

$$d_N = \sum_{i=1}^N d_{MC}(MC_i) \cdot d_T(T_i) \quad [9]$$

Donde  $d_N$  representa la dosis acumulada durante N días,  $d_{MC}(MC_i)$  es la dosis diaria relacionada con el contenido de humedad (MC) y  $d_T(T_i)$  es la dosis diaria relacionada con la temperatura (T), calculadas ambas por las siguientes expresiones:

$$d_{MC}(MC_i) = \begin{cases} (MC_i/0.3)^2 & \text{para } MC_i \leq 0.30 \\ 1 & \text{para } MC_i > 0.30 \end{cases} \quad [10]$$

$$d_T(T_i) = \begin{cases} 0 & \text{para } T_i < 0 \\ \frac{T_i}{30} & \text{para } 0 \leq T_i \leq 30 \\ 1 & \text{para } T_i > 30 \end{cases} \quad [11]$$



La diferencia entre los modelos I y II propuestos por estos autores radicaba en que el modelo II daba valores distintos de cero para contenidos de humedad (MC) inferiores al 30%, integrando así el efecto de los valores reducidos de contenido de humedad, lo que no hacía el modelo I. Este nuevo planteamiento resultaba coherente con el comportamiento real de los hongos de pudrición, ya que, aunque ciertas investigaciones reflejasen que el umbral de comienzo de la pudrición era del 30% (Schmidt, 2006; Brischke, 2007), también existían estudios (Morris y Winandy, 2002; Rapp *et al.*, 2000; Huckfeldt y Schmidt, 2006; Arnold, 2009 y más modernamente Meyer-Veltrup y Brischke, 2015; Brischke *et al.*, 2017) que establecían el umbral en el intervalo 20-30%.

La comparación entre ambos modelos arroja resultados muy similares, si bien el modelo II genera mayores dosis que el modelo I en situaciones de baja precipitación y es más sensible al contenido de humedad. Cualquiera de los modelos *dosis-respuesta* permite calcular la dosis diaria en forma de día completo o fracción de día en función de que las características del clima de material sean más o menos propicias para el desarrollo de los hongos y, por suma, la dosis anual. Por tanto, la dosis se da en número de días.

Pero estos modelos I y II se basan en el empleo del clima del material, lo que obligaría al conocimiento del correspondiente a cada lugar y por ello Brischke *et al.* (2011) y Früwald *et al.* (2012) propusieron un modelo climático mediante el cual entrando con los valores medios diarios de la humedad relativa y la presencia de precipitación superior a 4 mm, correspondientes a un año climático “tipo” (que ellos calcularon para 8000 localidades europeas usando el programa METEONORM), se estima el valor del MC diario.

El modelo climático propuesto por estos autores se basa en calcular el valor del MC de cada día como la suma de dos componentes distintos: uno debido a la humedad relativa (mediante la expresión de Tveit) y otro debido al incremento que se produce en el MC por efecto de la lluvia, el cual los autores lo calculan como una fracción del componente por humedad relativa. El sistema de cálculo propuesto tiene como variables, además de la humedad relativa y la presencia de precipitación superior a 4 mm, la duración de cada evento de lluvia y de secado.

La desventaja que tiene el modelo climático propuesto por Brischke *et al.* (2011) y Früwald *et al.* (2012) es su falta de resolución espacial, así como que todos los coeficientes que emplea, tanto para el cálculo del componente por lluvia como para el correspondiente de secado, son datos provisionales basados en trabajos no específicamente diseñados a este fin.

Con posterioridad, Brischke *et al.* (2013) efectuaron ligeras correcciones a su modelo de 2011 (modelo II), proponiendo el denominado Modelo Logístico Simplificado (SLM) en el que se daba un peso similar al efecto de la temperatura y el contenido de humedad, que se reflejaba en la siguiente ecuación:

$$d_{day} = \begin{cases} d_{MC} \times d_T & \text{si } d_{MC} > 0 \text{ y } d_T > 0 \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

La bibliografía refleja la existencia de trabajos posteriores sobre estos primeros modelos de dosis y así Isaksson *et al.* (2013), trabajando sobre la misma base experimental que Brischke *et al.* (2011), propusieron una nueva formulación para el Modelo II, antes visto, que denominaron modelo logístico (LM) y que implicaba dar un mayor peso al efecto de la temperatura, calculando la dosis diaria mediante la expresión siguiente:

$$d_{day} = \begin{cases} \frac{3.2 \times d_T + d_{MC}}{4.2} & \text{si } d_{MC} > 0 \text{ y } d_T > 0 \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

donde  $d_{MC}$  y  $d_T$  se calculan con las expresiones [5] y [6], respectivamente.

Comparando estos dos últimos modelos, el modelo logístico (LM), propuesto por Isaksson *et al.* (2013), parece ser más correcto desde el punto de vista físico pero el modelo simplificado (SLM), propuesto por Brischke *et al.* (2013) y de naturaleza más empírica, permite resolver algunos de los problemas existentes con los datos de partida, y más en concreto con la incertidumbre relacionada con su forma de adquisición (dispositivos de doble capa que maximizan el efecto de la temperatura).

En el mismo trabajo antes citado de Isaksson *et al.* (2013), estos autores también proponen un nuevo modelo *dosis-respuesta* denominado *set-back*, ya que los dispositivos experimentales que emplearon para el desarrollo de los primeros modelos (de doble capa) fomentaban la acumulación de humedad lo que hacía que la madera estuviera casi todo el tiempo por encima de un contenido de humedad del 25%, lo que hacía que la dosis calculada en cada lugar dependiera básicamente de la temperatura alejándose del comportamiento real de la madera al exterior cuyo MC fluctúa por encima y por debajo del 25%.

Para tener en cuenta este hecho y, sobre todo, considerando que en los periodos en los que la madera se encuentra por debajo de los umbrales de desarrollo de los hongos ( $T^a \leq 0^\circ\text{C}$  o  $T^a > 40^\circ$ ,  $MC < 25\%$ ) no solo se detiene su actividad, sino que, además, se produce un daño en su biología interna, incluyeron un nuevo parámetro denominado *set-back* que a efectos prácticos introducía una dosis de signo negativo, debido al secado, en el modelo de cálculo de dosis.

En este nuevo modelo el cálculo de la dosis anual sigue el patrón genérico del modelo II [9], cambiando el sistema de cálculo de los componentes  $d_{MC}(MC_i)$  y  $d_T(T_i)$ , que ahora serían calculados haciendo uso de las expresiones siguientes:

$$d_{MC}(MC_i) = \begin{cases} s & \text{para } MC_i < a \\ \frac{MC_i - a}{b - a} & \text{para } a \leq MC_i \leq b \\ 1 & \text{para } MC_i > b \end{cases} \quad [12]$$

$$d_T(T_i) = \begin{cases} 1 & \text{para } MC_i < a \\ 0 & \text{para } T < c \text{ y } MC \geq a \\ \frac{T}{d - c} & \text{para } 0^\circ\text{C} \leq T \text{ y } MC \geq a \\ 1 & \text{para } T > d \text{ y } MC \geq a \end{cases} \quad [13]$$

En las ecuaciones [12] y [13]:

$s$  es el *set-back*, que se calcula haciendo uso de la siguiente expresión  $s = \frac{MC - a}{a - e}$ , donde “ $e$ ” es un parámetro que se usa para modular un efecto más o menos intenso del *set-back*.

$a$ : límite inferior de MC para el desarrollo de los hongos, que se toma provisionalmente en 25%

$b$ : límite superior de MC para el desarrollo de los hongos, que se toma provisionalmente en 30%

$c$ : límite inferior de T para el desarrollo de los hongos, que se toma provisionalmente en  $0^\circ\text{C}$

$d$ : límite superior de T para el desarrollo de los hongos, que se toma provisionalmente en  $30^\circ\text{C}$

Pese a lo avanzado que resulta este modelo en su formulación; sin embargo, no es de aplicación práctica en tanto en cuanto no existen aún suficientes resultados de campo que permitan ajustar el valor del parámetro “ $e$ ”, motivo por lo cual los autores sugieren el empleo del modelo I para las localidades con climas más húmedos y el modelo II para las de clima más alternante.

Sobre la zonificación del riesgo, fueron Brischke *et al.* (2011), Thelandersson *et al.* (2011) y Frűwald *et al.* (2012) los primeros en proponerla a nivel europeo, calculando índices relativos de exposición en 60 localidades europeas obtenidos mediante el cociente entre el valor de la dosis anual de cada localidad (calculada a partir de su año climático tipo y del empleo del modelo II) y el de la estación-base de Uppsala (Suecia). En estos trabajos la dosis anual se empleó como medida del riesgo de pudrición de la localidad. La Figura 2 recoge las isolíneas correspondientes a los distintos valores que toma el índice relativo de exposición en Europa.

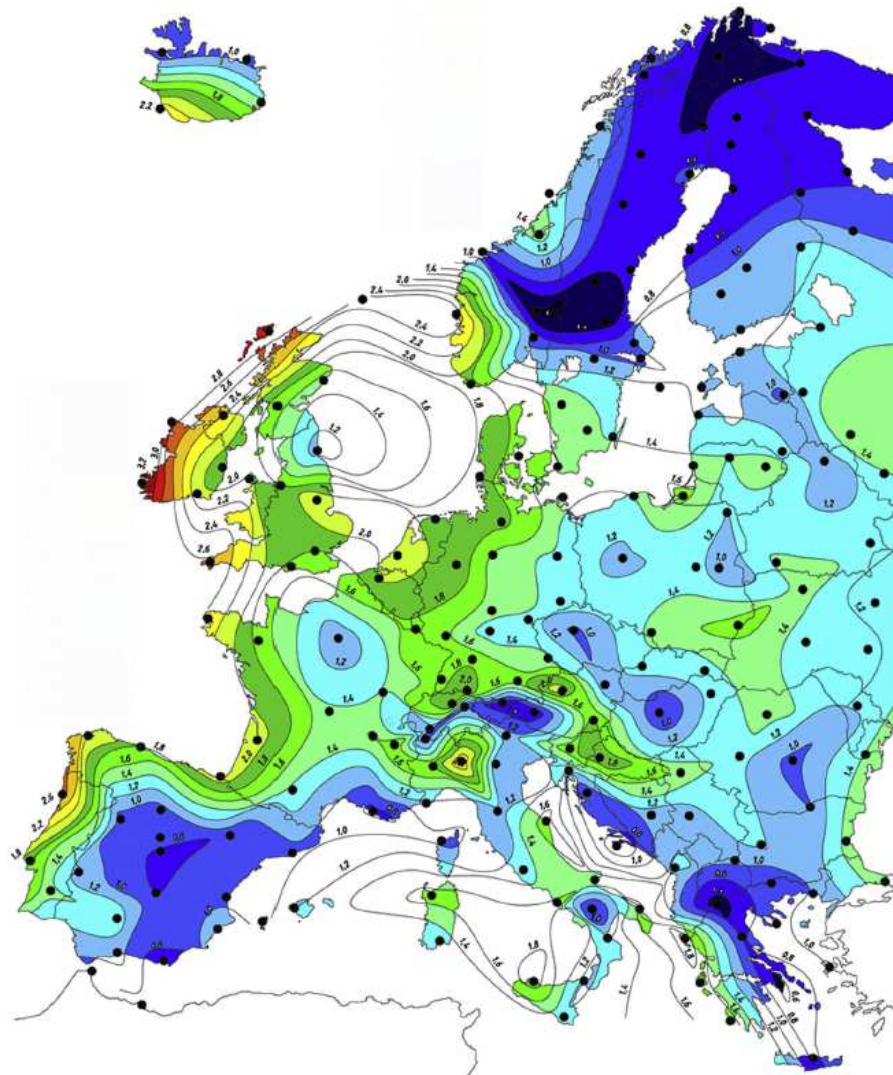


Figura 2. Índices relativos de riesgo europeos, respecto de la estación de Uppsala (Brischke *et al.*, 2011, Frűwald Hansson *et al.*, 2012).

De esta forma, se establece un sistema mediante el cual conociendo la dosis anual correspondiente a la estación de referencia es posible determinar la dosis correspondiente a cualquier estación multiplicando la dosis de referencia por el índice relativo de cada localidad.

La última contribución al desarrollo y uso de los modelos de dosis para la construcción de mapas de riesgo se debe a Niklewski *et al.* (2021), quienes calcularon los índices relativos de riesgo de pudrición a lo largo de toda Europa haciendo uso de dos modelos distintos, el logístico (LM) desarrollado por Isaksson *et al.* (2013) y el logístico simplificado (SLM) propuesto por Brischke *et al.* (2013), ambos obtenidos empleando la

base experimental de Brischke et al. (2011). Los resultados obtenidos, que hicieron uso de ambos modelos, fueron comparados entre sí, observándose que el modelo SLM ( $D_1$  en la Figura 3) resultaba ser muy sensible a la humedad relativa, lo que maximizaba el riesgo en las zonas con altos valores de humedad relativa, aunque tuvieran valores relativamente bajos de precipitación, mientras que el modelo LM ( $D_2$  en la figura 3) era muy sensible a la precipitación, lo que incrementaba el riesgo relativo en las estaciones más lluviosas.

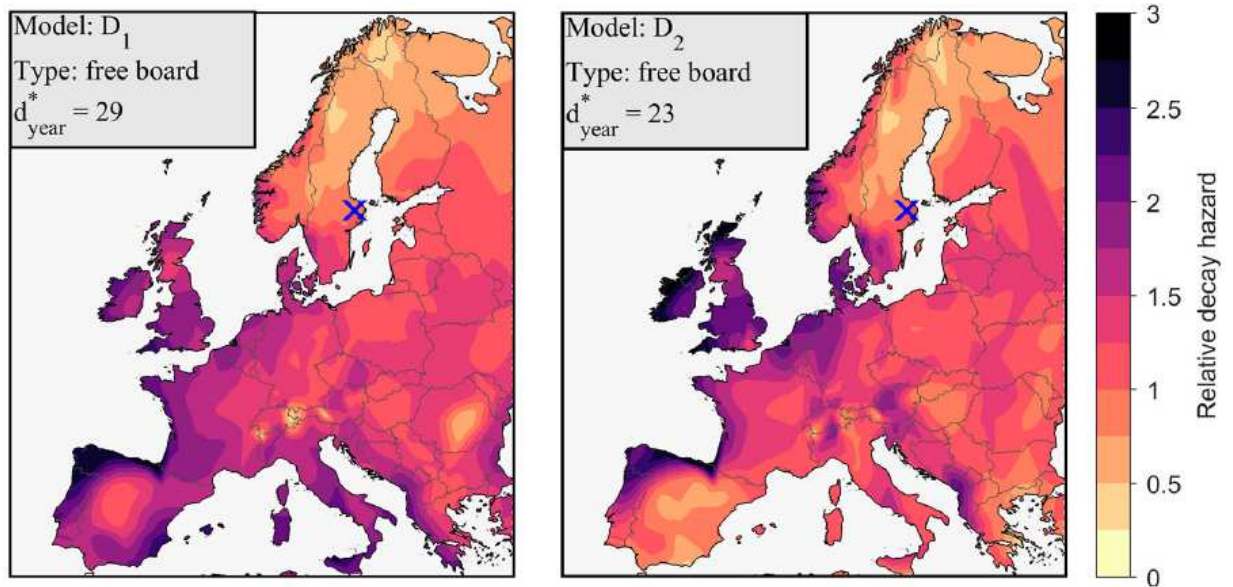


Figura 3. Mapas de riesgo relativo de pudrición en Europa, calculados mediante los modelos Logístico Simplificado ( $D_1$ ) y Logístico ( $D_2$ ). La cruz representa la estación de referencia de Uppsala (Suecia), en la que el riesgo relativo se considera 1.0. El valor de la dosis anual en la estación de referencia varía en función del modelo empleado para su cálculo, siendo 29 en el caso del modelo Logístico Simplificado ( $D_1$ ) y 23 en el del Logístico ( $D_2$ ) (Niklewski et al., 2021).

Aunque los mapas de riesgo potencial obtenidos con la ayuda de los modelos de *dosis-respuesta* tienen la innegable utilidad de presentar de una forma muy gráfica y práctica la existencia de grandes diferencias en los valores del índice relativo de degradación en el seno de Europa, la mayor crítica que puede hacerse a dichos mapas es que el valor de los índices varía con el modelo empleado. Otra crítica que puede hacerse es que la presencia de microclimas debido a grandes reservorios de humedad (ríos, lagos) o barreras naturales (montañas) hace difícil trazar los límites entre las diferentes regiones de riesgo dentro de Europa (Brischke y Shelter, 2020).

La influencia de la topografía en el clima del material y, como consecuencia, en el índice relativo de riesgo de pudrición fue estudiada por Brischke y Selter (2020) en dos regiones alpinas ubicadas en Suiza, demostrando que los accidentes topográficos pueden generar diferencias de hasta un 50% en las dosis de una zona respecto de las circundantes y, por tanto, la conveniencia de que la malla de puntos en la que se efectúan los análisis de dosis sea reducida y que en lugares de topografía muy variada se construyan mapas de riesgo de alta resolución.

De acuerdo con todo lo visto hasta ahora, la metodología a seguir para la obtención de los índices relativos de exposición de cada localidad mediante la técnica de los modelos dosis-respuesta queda reflejada en la Figura 4.

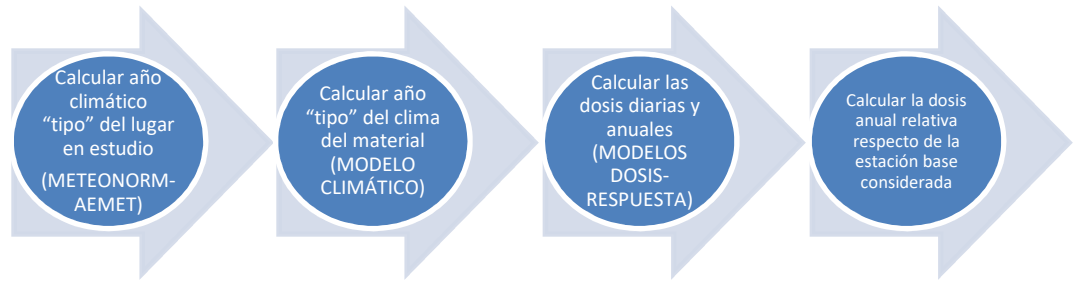


Figura 4. Esquema de la metodología de obtención de índices relativos de exposición por localidad.

De esta forma, se establece un sistema mediante el cual conociendo la dosis anual correspondiente a la estación de referencia es posible determinar la dosis correspondiente a cualquier estación multiplicando la dosis de referencia por el índice relativo de cada localidad.

Otra aproximación distinta a la modelización de la pudrición, pero no basada en el empleo de modelos *dosis-respuesta*, es la debida a Viitanen *et al.* (2010), quien trabajando mediante ensayos de laboratorio sobre probetas de albura de pino silvestre sometidas a diferentes condiciones de humedad relativa y temperatura construyó un modelo predictivo de la pérdida de masa causada por la actividad fúngica. En este modelo la pérdida de masa es tomada como un indicador de la progresión y severidad de la pudrición.

En este trabajo el proceso de pudrición fue modelado en dos pasos: un proceso de activación y un proceso de pérdida de masa. Un parámetro  $\alpha$  fue definido como medida del estado de actividad relativa de los hongos y del proceso de pérdida de masa. Este parámetro tomaba inicialmente el valor de 0 cuando la actividad fúngica era nula (fuera de las condiciones en las que los hongos pueden desarrollarse), creciendo gradualmente hasta alcanzar el valor de 1 cuando la actividad fúngica ya era completa, dándose con ello comienzo al proceso de pérdida de masa. Los autores propusieron una expresión para el cálculo del parámetro de activación en función de los valores de humedad relativa y de temperatura. Posteriormente y sobre la base de los datos climáticos ERA-40 (10 años), los autores propusieron un primer mapa de riesgos de pudrición de la madera en condición de clase de uso 2 para Europa, así como un segundo mapa válido para las condiciones de uso exterior, integrando el efecto de la lluvia como un evento de humedad relativa del 100%.

Otro modelo de pérdida de masa fue el propuesto por Thelandersson e Isaksson (2013), quienes desarrollaron el modelo denominado MRD (*Mould Resistance Design*), en el cual se calculaba, por un lado, la dosis debida a la contribución de la humedad relativa y por otro la debida a la temperatura, pero con la particularidad de considerar registros medios correspondientes a periodos de 12 horas para así tener en cuenta las variaciones entre la noche y el día. El modelo para el cálculo de la dosis acumulada durante un tiempo "t" ( $d_t$ ) compuesto por n medios días ( $n_{12}$ ), queda expresado como sigue:

$$d_t = \sum_{i=1}^{n_{12}} d_H(HR_{12i}) \cdot d_T(T_{12i}) \quad [14]$$

Las dosis  $d_H$  y  $d_T$  a aplicar en la expresión [14] se calculan según las funciones y criterios específicos que más abajo se detallan, tomando en consideración los valores medios (cada 12 horas) de HR y T de un clima específico de referencia.

<u>Intervalo de HR</u>	<u><math>d_H</math></u>
≤60%	-0.4
60-75%	$d_H = -2 + 0.0267 \cdot Hr_{12}$
>75%	$d_H = 0.5 \cdot e^{15.5 \cdot \ln(\frac{HR_{12}}{90})}$

Y

$$d_T = \begin{cases} e^{2.0 \cdot \ln(\frac{T_{12}}{20})} & \text{Si } 0.1 < T_{12} \leq 30 \text{ } ^\circ\text{C y } d_H > 0 \\ 1 & \text{si } d_H < 0 \end{cases} \quad [15]$$

Respecto de los dos modelos de pérdida de masa antes citados existen diversos aspectos que justifican su falta de uso práctico, como son:

- No se consideran valores de MC superiores al Punto de Saturación de las Fibras (porque las condiciones de humectación máxima son las correspondientes a una HR del 100%), lo que infraestima la degradación debida a la lluvia y la retención de agua por parte de maderas muy permeables.
- Considera condiciones de degradación ideales, de laboratorio, que no tienen nada que ver con las que se dan en la realidad, con climas cíclicos e intervención de la lluvia.
- Falta la verificación de sus resultados con resultados reales, lo que los propios autores indican en su estudio.
- La aproximación es muy teórica, no existiendo desarrollos posteriores.
- La cinética del desarrollo de la degradación depende del método de laboratorio empleado (Imken *et al.*, 2020)

Con carácter general puede afirmarse que el trabajo con modelos predictivos de la degradación está sometido a grandes incertidumbres, apuntándose las siguientes críticas:

- Que el número y localizaciones seleccionadas para la instalación de los dispositivos experimentales, cuyos datos son fundamentales para su construcción, han de ser representativas de todas las existentes, siendo este precisamente uno de sus puntos más débiles.
- Que los dispositivos experimentales empleados están diseñados para acelerar la degradación y no guardan una estrecha relación con los diseños en los que habitualmente se usa el material.
- Que la pudrición suele comenzar en puntos concretos de la superficie (normalmente asociados a fendas) en los que no están ubicados los sensores de medición del contenido de humedad con que van dotados los dispositivos experimentales.
- Que, al existir hongos diversos con cinéticas degradativas diversas, en puro rigor habría que construir modelos distintos para cada uno de ellos.
- Que el año climático “tipo” empleado en cada localidad para calcular la dosis de degradación en él sea realmente representativo de todos y cada uno de los habidos durante el tiempo de exposición, lo que es muy cuestionable en una época de intenso cambio climático.
- Que la relación entre el clima meteorológico y el clima del material depende de múltiples variables, tales como la especie (su mayor o menor absorción de agua y facilidad de secado), la posición (vertical u horizontal) o la existencia de barreras (por ejemplo, barnices o chapas) y trampas de humedad (fendas, uniones, atejado); lo que afecta al ajuste real de los modelos climáticos.

De todo lo anterior se deduce que los modelos son herramientas indudablemente útiles para el estudio de aspectos relativos, pero las determinaciones de tipo absoluto que con ellos se obtienen deben ser tomadas con cautela (Niklewski et al., 2021).

Con respecto a los ensayos necesarios para el desarrollo y/o validación de los modelos, así como para analizar la influencia de las variables de diseño y la especie, Thelandersson et al. (2011) propusieron exitosamente emplear una configuración de referencia, consistente en usar una tabla de 22x95 mm<sup>2</sup> de sección transversal y longitud variable (al menos de 500 mm para evitar el efecto testa o en caso contrario sellar las testas). La colocación de esta tabla debe ser horizontal y estar apoyada de tal forma que no existan trampas de humedad y que todas sus cuatro caras estén perfectamente ventiladas, estando sólo la cara superior expuesta a la acción de la lluvia. Para minimizar la influencia de las fendas, la tabla ha de colocarse con su cara radial hacia arriba. Los sensores de monitorización del contenido de humedad han de ser introducidos en la madera por la zona media de la cara inferior hasta el centro de la pieza (Figura 5). Dado el efecto de la especie en el comportamiento, se emplea como referencia la madera de abeto rojo (*Picea abies*).

Las nuevas configuraciones de ensayos de comportamiento de la madera al exterior difieren notablemente de las tradicionalmente empleadas, que seguían las prescripciones de las normas EN 252 (2015) y EN 330 (2015). La configuración y metodología de medida de los ensayos incluidas en estas dos normas perseguían analizar de forma comparativa el efecto de los diferentes tratamientos en la durabilidad del material (en clase de uso 4 con la norma EN 252 y en clase de uso 3 con la norma EN 330), exigiendo tan sólo la monitorización del grado de pudrición presente. Por el contrario, en las nuevas configuraciones de ensayo se exige no sólo adoptar disposiciones y dimensiones distintas de las probetas de ensayo sino, también, monitorizar la temperatura y el contenido de humedad con el tiempo junto con su estado de conservación. Esto se hace así para poder comparar el comportamiento del material dispuesto al exterior en situaciones climáticas distintas y con resultados obtenidos en condiciones de laboratorio.

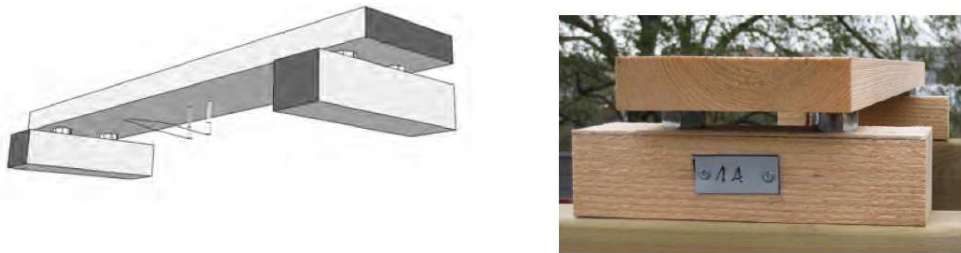


Figura 5. Dispositivo de ensayo “tipo” (Thelandersson et al., 2011).

Para hacer frente a la necesidad de contar con amplias bases de datos, que comprendan todas las variables inherentes al uso de la madera en la construcción (climas, especies, configuraciones constructivas, tratamientos, etc.), el IRG (*International Research Group on Wood Protection*) ha establecido una base de datos en la que se pueden publicar los resultados obtenidos en las diferentes experiencias y proyectos nacionales (<http://www.irg-wp.com/durability/documents/index.html>).

Para la mejora de los modelos, otro aspecto fundamental es la optimización de los sistemas de medida del contenido de humedad de la madera. Estos sistemas optimizados de medida son necesarios para la medición del contenido de humedad tanto en los dispositivos de ensayo como en las estructuras en servicio, usados ambos para la validación de los modelos.

En este sentido, han sido numerosos los estudios llevados a cabo sobre la aplicación y puesta a punto de los métodos de monitorización continua del contenido de humedad de la madera expuesta al exterior (Brischke *et al.*, 2008b; Fredriksson, 2010; Dyken y Kepp, 2010; Tannert *et al.*, 2010 y 2011; Fernández-Golfín *et al.*, 2012 y 2014; Fortino *et al.*, 2013; Hasan *et al.*, 2013; Brischke y Lampen, 2014; Olsson, 2014; Dietsch *et al.*, 2015a y b; Cavalli y Togni, 2015; Franke *et al.*, 2015; Lanata, 2015; Brischke *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2018; Niklewski *et al.*, 2018; Conde *et al.*, 2021c). En general el método de medida seleccionado en estos trabajos ha sido el de resistencia eléctrica, por ser el más sencillo de implementar, más seguro y fiable, aunque sus medidas no sean fiables en madera con elevados niveles de pudrición (Brischke *et al.*, 2018).

## 2. Mediante el empleo de índices climáticos

En este caso el índice básico ( $I_{50}$ ) ha de ser obtenido usando alguno de los índices climáticos de utilidad para la factorización del riesgo de pudrición.

El trabajo más importante sobre el desarrollo de un índice de riesgo de pudrición es el debido a Theodore Scheffer, en 1971. Trabajando en el territorio continental de Estados Unidos, Scheffer propuso un índice climático que empleaba variables meteorológicas (frecuencia de precipitación y temperatura del aire) para estimar el potencial de pudrición de un lugar concreto. A diferencia de los modelos antes vistos, con los que se obtienen resultados medibles como son la pérdida de masa o la dosis de pudrición, el índice Scheffer (SCI) es un índice muy simplista cuya salida se da en términos de riesgo relativo de pudrición.

La formulación original del índice Scheffer, establecida en grados Celsius, es la siguiente:

$$SCI = \sum_{ene}^{dic} \frac{(T-2) \cdot (D-3)}{16.7} \quad [16]$$

Donde D es el número medio de días al mes con lluvia superior o igual a 0,25 mm (1 pulgada) y T es la temperatura media mensual en °C. Para evitar que la expresión [16] pueda producir valores del SCI negativos los valores mensuales negativos se toman como cero.

Haciendo uso de este índice climático, Scheffer consideró para el territorio continental de Estados Unidos tres zonas climáticas distintas, en función del valor calculado del SCI de acuerdo con la expresión [16]:

- Zona 1 (Riesgo reducido), para valores del SCI < 35
- Zona 2 (Riesgo medio), para valores del SCI entre 35 y 65 ( $35 \leq SCI < 65$ )
- Zona 3 (Riesgo alto), para valores del SCI  $\geq 65$

Según Scheffer, conforme el valor del SCI es mayor también lo será el riesgo de pudrición de la madera. En el territorio continental de EE.UU. los valores variaban entre cero para Yuma (Arizona) y 137,5 para West Palm Beach (Florida).

De acuerdo con Carll (2009), el SCI es un “índice mediante el cual se puede comparar el riesgo relativo entre diferentes localidades, no siendo un índice cuyo objetivo sea predecir la propagación de la pudrición ni el tiempo hasta la rotura en construcción”. Este carácter de índice relativo es precisamente lo que lo ha convertido en especialmente útil, y en el índice más empleado a la hora de construir mapas de riesgo relativo de pudrición como consecuencia del clima, así como en un índice de extrema utilidad a la hora de analizar la evolución del riesgo con el tiempo, constituyendo también un buen indicador del cambio climático. Su punto débil frente a los modelos de dosis-respuesta antes vistos es que no sirve para predecir la vida en servicio, lo que ha



dado lugar a que mucha de la investigación se haya orientado hacia el desarrollo de modelos que permitan predecirla.

El SCI ha sido usado en la construcción de mapas de riesgo en varios países y regiones como Canadá (Setliff, 1986), Norteamérica (Morris *et al.*, 2008; Larkin y Laks, 2008; Lebow y Carll, 2010), Corea (Kim *et al.*, 2011; Kim y Ra. 2013 y 2014), China (Wang *et al.*, 2007), Japón (Hasegawa, 1996; Akita *et al.*, 2014), Australia (Wang *et al.*, 2008), Noruega (Liso *et al.*, 2006), España (Fernández-Golfín *et al.*, 2016), Grecia (Kikolitsa y Giarma, 2019) y Europa en global (Brischke *et al.*, 2011; Nijland *et al.*, 2014; Niklewski *et al.*, 2016, 2021).

Varios son los trabajos (Carll, 2009; Wang y Morris, 2008; Nijland *et al.*, 2009) que se han llevado a cabo utilizando este índice para construir mapas de cambio climático.

Con posterioridad, este índice ha sido modificado por diversos autores para incorporar el efecto de la lluvia torrencial (Cornick y Dalgliesh, 2003), las condensaciones (Fernández-Golfín *et al.*, 2016) o el diseño de los detalles constructivos entre otros parámetros (Wang *et al.*, 2008).

Akita *et al.* (2014) usaron datos meteorológicos anuales (temperatura y precipitación medias anuales, así como número de días de lluvia) para comparar la utilidad de diversos índices climáticos en la predicción de la degradación por hongos en diques de madera ubicados en diferentes localidades de Japón. Los índices usados fueron:

- Scheffer [16]
- De aridez (AI), creado por Martonne (1942) como predictor de humedad del suelo, formulado según la siguiente expresión:

$$AI = \frac{P}{T+10}$$

donde P es la precipitación media anual y T la temperatura media anual

- De calentamiento (WI), creado por Hasegawa (1996) fundamentalmente para expresar la relación entre la temperatura y la vegetación y cuya formulación es como sigue:

$$WI = \sum(a - 5)$$

donde "a" es la temperatura media mensual

Estos autores concluyeron que sólo el índice Scheffer era útil en esta función predictiva, ya que era capaz de explicar el 75% de la pudrición observada durante un plazo de 5 años.

Con respecto al uso del SCI en la construcción de mapas de índices de riesgo en Europa, Niklewski *et al.* (2021) reportaron valores del SCI entre 17,5 y 70, existiendo valores máximos de 100 en Irlanda, Noroeste de España y el sur de la península balcánica. En la Figura 6 se recoge el mapa publicado por Niklewski *et al.* (2021), el cual, si se compara con los mapas de la Figura 3, obtenidos por estos mismos autores, pero usando dos modelos de *dosis-respuesta* (LM y SLM), se observará que la variabilidad es muy similar a nivel europeo, lo que ya por sí solo es indicador de la utilidad de este índice a la hora de construir mapas de riesgo relativo.

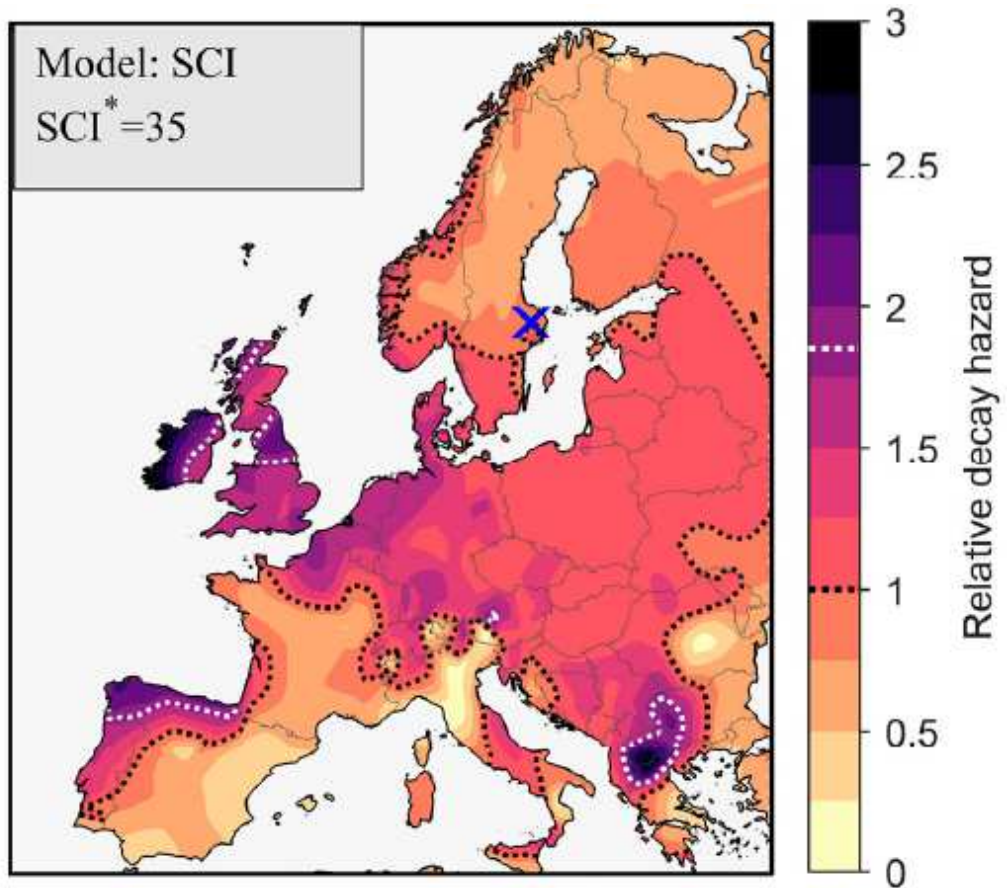


Figura 6. Mapa de riesgo relativo de pudrición en Europa, calculado mediante el índice Scheffer. La cruz marca el sitio de referencia (Uppsala) para el que el índice relativo de riesgo se iguala a uno, con un SCI igual a 35. Las líneas de puntos establecen los límites de las tres zonas en las que puede subdividirse el territorio europeo empleando la subdivisión zonal propuesta originalmente por Scheffer (1971) (Niklewski *et al.*, 2021).

Análogamente Brischke *et al.* (2011) obtuvieron valores del SCI entre 81,0, en el Suroeste de Francia, y 3,9, en el norte de Noruega, o 5,6 en Rumanía. Todo ello pone de manifiesto que en el conjunto del continente europeo el riesgo inducido por el clima varía notablemente (Figura 7).

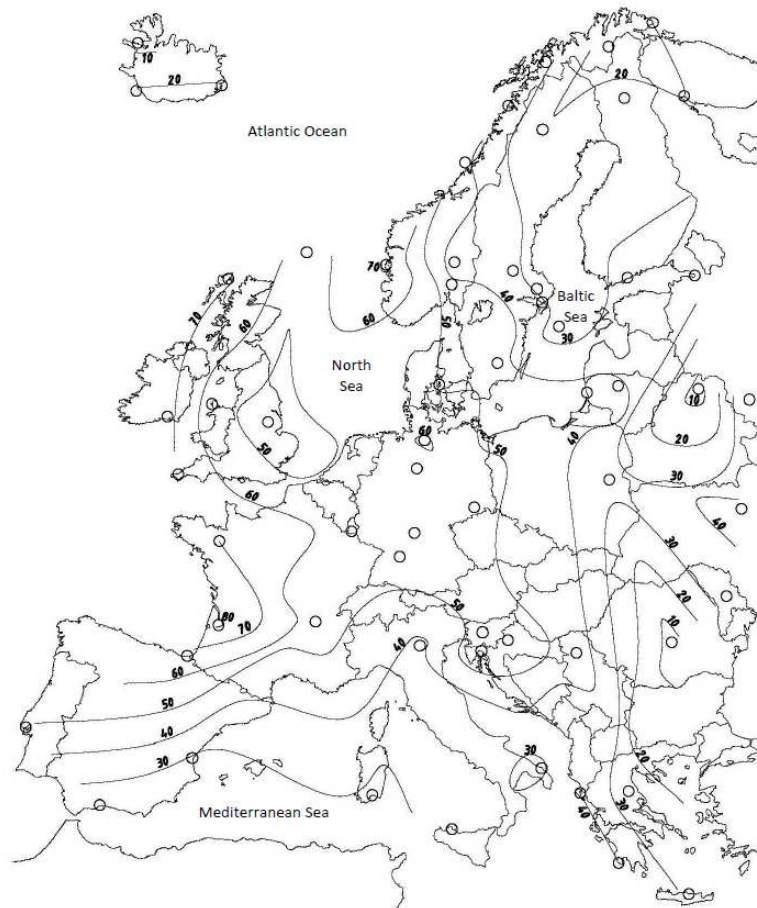


Figura 7. Mapa de riesgo de pudrición en Europa, según el valor absoluto del índice Scheffer (Brischke et al., 2011). Un mapa de isolíneas de índice relativo podría obtenerse dividiendo los valores absolutos del índice entre 35, valor del SCl en la estación de referencia de Uppsala (Suecia).

Tal y como puede deducirse de toda la información contenida en los apartados 1 y 2, el método más eficaz para la obtención de los mapas de riesgo relativo y de los índices relativos de riesgo básico de degradación (ecuación [2]) es el del índice Scheffer, de acuerdo con los siguientes razonamientos:

1. El índice Scheffer puede ser calculado con sencillez directamente a partir de datos meteorológicos básicos (temperatura media y número de días de lluvia mayor que 0, 25 mm mensuales), que están disponibles localmente en cualquier Agencia o Centro de meteorología.
2. El índice Scheffer es un índice climático mundialmente aceptado que, además, puede ser empleado como indicador de cambio climático.
3. La distribución zonal establecida por el índice Scheffer es muy similar a la establecida por los modelos de dosis-respuesta más aceptados, siendo éstos últimos de cálculo mucho más complicado.

De acuerdo con todo lo visto en los dos apartados anteriores, el cálculo del índice básico de exposición (dosis de degradación anual acumulada)  $I_{s0}$  de la expresión [2] deberá ser hecho de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$I_{s0} = d_{year} \cdot I_R \quad [17]$$

Donde:

IR es el índice relativo de riesgo de la estación bajo análisis, obtenido de alguna de las formas antes vistas (mediante modelos dosis-respuesta o SCI)

$d_{year}$  es la dosis de degradación anual en la estación de referencia (hasta ahora Uppsala), esta dosis se expresa en forma de días y se obtiene como suma de las dosis diarias (Meyer-Veltrup *et al.*, 2017) en el material (*Picea abies*) y dispositivo de referencia.

Teniendo esto en cuenta, la dosis de degradación anual ( $d_{year}$ ) debe definirse como la que acumula un elemento de madera de abeto rojo (*Picea abies*) sin tratar, de dimensiones 22x95x500 mm<sup>3</sup>, dispuesta horizontalmente con su cara radial hacia arriba y carente de trampas artificiales para la lluvia. Hasta el momento la estación considerada como de referencia es la de Uppsala (Suecia).

La gran mayoría de los diseños constructivos al exterior conllevan situaciones de riesgo de almacenamiento de humedades superiores a las consideradas en el diseño de referencia, lo que incrementa el riesgo de pudrición. Para tener en cuenta estas situaciones de incremento del riesgo por causa del diseño, así como los condicionantes locales de exposición, en la expresión [2] el valor del índice básico de exposición (Is0) viene multiplicado por una serie de factores, entre los que es habitual (lista no exhaustiva) añadir los siguientes (Fernández-Golfín *et al.*, 2018):

- $k_{s1}$ : factor de exposición básica, que mayor o menor en función de la mayor o menor severidad de la exposición local a la humedad (mesoclima).
- $k_{s2}$ : factor por geometría del elemento, que mayor o menor en función de la geometría y naturaleza del elemento (madera sólida, laminada, encolada) para tener en cuenta su mayor o menor facilidad de secado completo.
- $k_{s3}$ : factor por protección por aleros y cornisas, que mayor o menor en función del vuelo y orientación del alero respecto de los vientos dominantes de lluvia.
- $k_{s4}$ : factor por sobreelevación del suelo, que mayor o menor en función de la distancia del elemento de madera en estudio respecto del suelo, lo que tiene en cuenta el riesgo de humectación por salpicado o nieve.
- $k_{s5}$ : factor por diseño constructivo, que mayor o menor en función de su capacidad para retener o dejar fluir y secar rápidamente el agua de lluvia. Este riesgo se valora de forma distinta según la disposición relativa del elemento (horizontal o vertical), de la presencia y diseño de las uniones, del nivel de ventilación del elemento, etc.
- $k_{s6}$ : factor a emplear en situaciones especiales que se dan en proyectos de rehabilitación. Tiene en cuenta la forma en la que se resuelve el encuentro de los elementos estructurales de madera con los muros de fachada, del estado sanitario de estos o de la clase higrométrica de los locales.
- $C_a$ : Factor de calibración, que deberá ser obtenido contrastando los datos experimentales con los estimados

La bibliografía recoge diferentes estudios (Morris y Winandy, 2002; Brischke *et al.*, 2008; Viitanen *et al.*, 2009; Borneman *et al.*, 2012; Isaksson *et al.*, 2013b; Meyer-Veltrup y Brischke, 2017; Humar *et al.*, 2019; Niklewski *et al.*, 2021; Niklewski y Fredicksson, 2021; Conde *et al.*, 2021b) y guías de diseño constructivo (Jermer *et al.*, 2011; Thekandersson *et al.*, 2011; Viitanen *et al.*, 2011; Isaksson *et al.*, 2015; Fernández-Golfín *et al.*, 2018), en los que se analiza el comportamiento de la madera en diversas soluciones constructivas (especialmente fachadas y suelos al exterior) aunque mayoritariamente efectuados en climas del norte de Europa y donde se proponen valores de los coeficientes anteriormente señalados.

De momento no existen valores universalmente aceptados para estos coeficientes ( $k_{si}$ ) ni normas de carácter transnacional (CEN, ISO) que los incluyan. Respecto del cálculo de la dosis de degradación inducida por el clima meteorológico, se puede afirmar que el método

de cálculo del miembro denominado “Exposición” en la inequación [1] está todavía en fase de desarrollo.

## B.- Cálculo del valor de la Dosis de resistencia

Respecto del cálculo del valor característico de la Dosis de Resistencia ( $D_{RD}$ ) en la expresión [1], adoptaremos la expresión propuesta por Isaksson *et al.* (2015), Meyer-Veltrup *et al.* (2017), Alfredsen *et al.* (2021) y Brischke *et al.* (2021a):

$$D_{RD}=D_{crit} * k_{wa} * k_{inh} \quad [18]$$

En la expresión [18]  $D_{RD}$  es la dosis de resistencia de diseño,  $D_{crit}$  es la dosis crítica que corresponde a un estado límite de servicio descrito como “inicio de la pudrición” (*onset of decay*), definido como el correspondiente a un estado de pudrición tipo 1 ó 2 según la norma EN 252, que se corresponden con un ataque leve (muy superficial) o moderado (de 2 a 5 mm de profundidad en zonas muy localizadas);  $k_{wa}$  es un primer factor corrector que tiene en cuenta el efecto de la especie de madera en la durabilidad,  $k_{inh}$  es un segundo factor que tiene en cuenta las propiedades protectoras del material empleado (por ejemplo, por tratamientos químicos preventivos aplicados). Como en el caso del cálculo del índice básico de exposición, correspondiente al miembro “Dosis de exposición” de la inequación [1], los factores correctores ( $k_{wa}$ ,  $k_{inh}$ ) tienen carácter relativo respecto del material de referencia y  $D_{crit}$ , corresponde a la dosis crítica del material considerado como de referencia: la madera de abeto rojo (*Picea abies*) sin tratar de dimensiones 22x95x500 mm<sup>3</sup>, dispuesta horizontalmente con su cara radial hacia arriba y carente de trampas artificiales para la lluvia.

Un aspecto fundamental para el cálculo del valor característico de la resistencia consiste, a su vez, en el cálculo de la dosis crítica de pudrición ( $D_{crit}$ ), correspondiente al material y disposición de referencia.

Como ocurrió con el cálculo del valor del índice básico de exposición, para el cálculo del valor característico de la resistencia ( $D_{crit}$ ) existen en la bibliografía distintas aproximaciones, que pasaremos a analizar.

### 1. Mediante el empleo de modelos dosis-respuesta

Brischke y Rapp (2010a), trabajando sobre albura de pino silvestre (*Pinus sylvestris*) y duramen de abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii*), y haciendo uso de su modelo dosis-respuesta (modelo I) propusieron la función [19] para relacionar el nivel de pudrición con la dosis total (D) soportada por el elemento de madera bajo estudio (calculada como la suma de las dosis diarias durante el tiempo necesario para alcanzar un determinado nivel de pudrición, evaluado de acuerdo con la norma EN 252:1989).

$$\text{Nivel de pudrición (y)} = 4 \cdot e^{-e^{(1.7716-0.0032 \cdot D)}} \quad [19]$$

Esta expresión [19] queda gráficamente reflejada en la Figura 8.

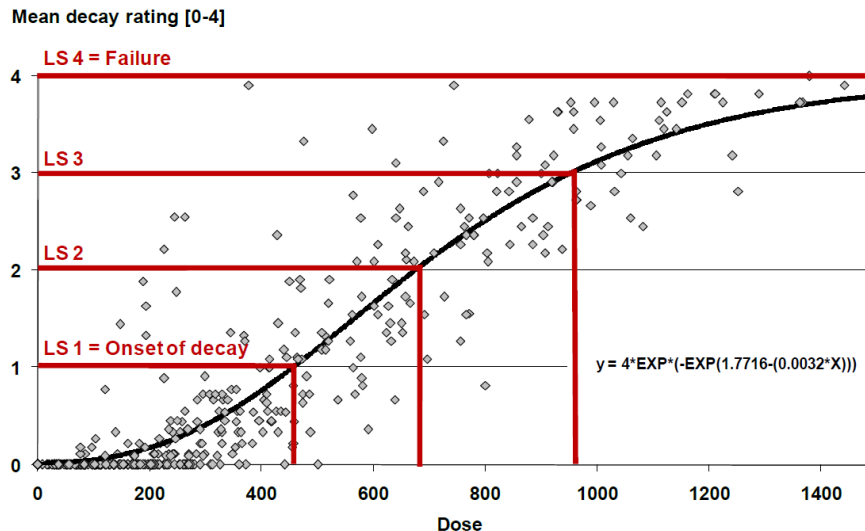


Figura 8. Relación entre la dosis de degradación calculada con el Modelo (I) dosis-respuesta y el nivel de pudrición evaluado según la norma EN 252:1989. LS = estado Límite de Servicio (Brischke et al., 2010c).

Tal y como puede deducirse del análisis de la figura 7, la dosis inducida por el clima del material está claramente relacionada ( $R^2=0,81$ ) con la pudrición observada como respuesta, pero el modelo sufre la consecuencia de la dispersión de datos. Se puede observar la existencia tanto de experiencias en las que a muy bajas dosificaciones aparecen niveles de pudrición elevados como de otras en las que el comportamiento es justamente lo contrario. Por ello, el modelo anterior puede ser considerado como una tendencia, no permitiendo la determinación precisa de la dosis en unas condiciones determinadas.

Esta expresión [19] valdría, en principio, para calcular las dosis críticas medias que llevan a la superación de los diferentes posibles estados límite de servicio (LS), lo que resulta fundamental para el desarrollo del miembro derecho (resistencia) de la inequación [1].

Isaksson et al. (2013), trabajando sobre el mismo soporte experimental que Brischke y Rapp (2010a), que implicaba el uso de albura de pino silvestre y duramen de abeto Douglas, encontraron que la dosis crítica  $D_{crit}$  se podía considerar sensiblemente independiente del material y que la diferencia entre especies y tratamientos podía ser establecida determinando las diferencias en la capacidad de humectación y secado inherentes a cada material, lo que queda integrado en el factor  $k_{wa}$ . Para las dos especies analizadas, Isaksson et al. (2013) propusieron una dosis crítica de 325 días con condiciones favorables para el desarrollo de los hongos, valor que luego fue utilizado por Isaksson et al. (2015) para hacer evaluaciones de diseño. Brischke y Meyer-Veltrup (2016), trabajando sobre albura de pino silvestre, albura y duramen de abeto Douglas, duramen de alerce europeo y abeto rojo en dispositivos de doble capa (dispositivo experimental de Brischke y Rapp, 2010a), propusieron una dosis crítica de 230 días para la pudrición parda, considerando un límite de servicio de nivel 1 (pudrición incipiente).

## 2. Mediante el empleo de otros modelos

Sobre la misma base experimental de Viitanen (1997a), primero Hukka y Viitanen (1999) y después Isaksson et al. (2010), reformularon el modelo inicial de Viitanen (1997a), en el que se establece el tiempo crítico para el desarrollo de mohos en la superficie de una madera de albura de pino silvestre y *Picea* sometida a condiciones

constantes de HR y temperatura. La última formulación se debe a Isaksson *et al.* (2010), quedando como sigue:

$$t_{crit} = e^{(-0.74 \ln T - 15.53 \ln HR + 75.736)} \quad [20]$$

Siendo válida la expresión [20] para valores de HR entre 75 y 100% y de temperatura entre 0.1°C y 40°C.

Otros autores que intentaron también aproximarse hacia la determinación del momento en el que la presencia de mohos supera el valor de un límite de servicio, fueron Thelandersson e Isaksson (2013) quienes emplearon su modelo denominado como MRD (*Mould resistance design*).

Todos estos autores utilizaron modelos orientados hacia la determinación del momento de la aparición de mohos en la superficie de la madera, límite de servicio que es totalmente distinto al contemplado por Brische *et al.* (2010a, 2011), que estaba basado en la determinación del momento en el que el desarrollo de hongos llevaba a un nivel de degradación 2 de la norma EN 252. El desarrollo de mohos y el de hongos de pudrición son procesos separados que siguen cinéticas distintas y que, por tanto, tienen aproximaciones matemáticas también diferentes. De hecho, las condiciones de humedad relativa para el desarrollo de mohos se sitúan entre el 80 y el 95%, mientras que para el desarrollo de hongos está entre 95 y 100% (Viitanen *et al.*, 2009).

Las primeras isoplejas o modelos de crecimiento de mohos se basaron en los estudios de laboratorio sobre cultivos de agar utilizando diferentes mohos (Ayerst, 1969; Block, 1953, Smith y Hill, 1982; Grant *et al.*, 1989). Sobre la base de resultados, fueron desarrolladas diferentes funciones o isoplejas sobre humedad crítica y niveles de temperatura. Más tarde también se introdujeron conceptos como el tiempo de mojado (TOW) y diferentes condiciones de humedad y temperatura fueron analizadas (Adan, 1994; Viitanen, 1996).

Los estudios de Viitanen (1997a), Hukka y Viitanen (1999), Isaksson *et al.* (2010) y Thelandersson e Isaksson (2013) sobre desarrollo de mohos no resultan concluyentes para la determinación de la dosis crítica  $D_{crit}$ , por cuanto el momento de aparición de mohos depende de las condiciones climáticas circundantes (que los autores emplearon de laboratorio, basadas en temperatura y HR constantes) y el resultado se da en términos de días.

Viitanen *et al.* (2010) con su modelo de pérdida de masa también realizaron una aproximación al cálculo del tiempo en servicio basándose en la relación existente entre la pérdida de masa (indicador de la intensidad del ataque) y las propiedades elastomecánicas del material, si bien sus variables independientes tan solo eran la temperatura y la humedad relativa, condiciones muy de laboratorio que no guardan una estrecha relación con las reales, especialmente por ser constantes.

Respecto de los valores modificadores de la dosis crítica  $D_{crit}$  ( $k_{wa}$ ,  $k_{inh}$ ), en la bibliografía todavía no existen trabajos concluyentes, o normalizados, que permitan considerar la existencia de valores universalmente aceptados.

En lo que hace referencia al efecto de la especie ( $k_{wa}$ ), han sido propuestos varios métodos no normalizados (Van Acker *et al.*, 2014). Brischke *et al.* (2014) y posteriormente Meyer-Veltrup *et al.* (2017), compararon entre sí todos los métodos de utilidad, existentes hasta ese momento, para evaluar la capacidad de absorción y secado de la madera sin llegar a conclusiones determinantes. Posteriormente, Kržišnik *et al.* (2020) y Emmerich *et al.* (2020) compararon estos métodos de ensayo de laboratorio entre sí y con ensayos al exterior, no llegando a un resultado concluyente que permita ser optimista sobre la

posibilidad de establecer un método de laboratorio común y normalizado para caracterizar el comportamiento de la madera ante la humedad.

Isaksson *et al.* (2015) propusieron los valores de  $k_{wa}$  y  $k_{inh}$  contenidos en la Tabla 2, expresados de forma relativa respecto del comportamiento de la madera de abeto rojo (*Picea abies*), al que le corresponde un valor de  $k_{wa}/k_{inh} = 1.0$  por ser el material de referencia,

Tabla 2. Valores de  $k_{wa}$  y  $k_{inh}$  propuestos por Isaksson *et al.* (2015).

Especie de madera	$k_{wa}$	$k_{inh}$
Abeto rojo ( <i>Picea abies</i> ) (1)	1.0	1,0
Albura de Pino silvestre ( <i>Pinus sylvestris</i> )	0.8	1,0
Duramen de pino silvestre ( <i>Pinus sylvestris</i> )	1.5	1,5
Duramen de alerce europeo ( <i>Larix decidua</i> )	1.5	1,5
Duramen de alerce siberiano ( <i>Larix sibirica</i> )	1.5	1,5
Duramen de abeto Douglas ( <i>Pseudotsuga menziesii</i> )	1.5	1,5
Duramen de Roble europeo ( <i>Quercus robur</i> )	1.0	1,5
Duramen de Robinia ( <i>Robinia pseudacacia</i> )	1.5	2,5
Duramen de cedro rojo ( <i>Thuja plicata</i> )	1.5	5,0
Albura tratada con protector CU 3.2 NP5	1.0	5,0
Albura tratada con protector CU 4 NP5	1.0	8,0
Materiales revestidos (2)	2.0	-
Madera termotratada de pino silvestre y abeto rojo	1.0	2,5
Albura furfuralada de pino radiata, Pino amarillo y Pino silvestre (WPG 50%)	1.0	5,0
Albura acetilada de pino radiata, pino Amarillo y pino silvestre (contenido en acetil >20%)	1.0	8,0
Compuestos madera-plástico (WPC)	1.0	5,0
(1) No existe diferencia significativa entre albura y duramen		
(2) Este factor sólo se podrá emplear si existe un programa de supervisión periódica del estado de conservación de los acabados superficiales, considerando como límite de servicio la aparición de fisuras		
WPG=Porcentaje de ganancia de peso		

Es necesario indicar que como todavía no existen métodos de ensayo universalmente aceptados, los valores de  $k_{wa}$  y  $k_{inh}$  antes citados solo pueden ser considerados como provisionales.

Los valores de  $k_{inh}$  de la Tabla 2 corresponden a materiales homogéneos. Esto supone que la pieza está compuesta íntegramente por albura o por duramen y en el caso de madera tratada lo está por albura tratada/modificada químicamente de acuerdo con la especificación.

En el caso de piezas compuestas simultáneamente por albura y duramen los valores de los factores  $k_{wa}$  y  $k_{inh}$  serán distintos. Puesto que hay todavía una falta de conocimiento sobre el valor de ambos factores en todas las situaciones que se pueden dar en el uso constructivo de la madera, Isaksson *et al.* (2015) inciden sobre la necesidad de emplear el sentido común y la experiencia.

Conde *et al.* (2021) haciendo uso de una metodología propia, basada en el empleo de ensayos al exterior con el método de exposición de referencia (Thelandersson *et al.*, 2011) y en el análisis del efecto de la humedad según el número de días en los que la madera permanecía con un contenido de humedad superior o igual a 18%, estudiaron el efecto relativo de la especie, proponiendo para  $k_{wa}$  un valor de 1,0 para las coníferas, de 2,51 para el duramen de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) y de 1,84 para el castaño (*Castanea sativa*). En este trabajo la madera que se toma de referencia fue la de abeto rojo (*Picea abies*).

Los datos de  $k_{wa}$  obtenidos por Conde *et al.* (2021) para coníferas son sensiblemente coincidentes con los obtenidos en un reciente y extenso trabajo conjunto de Alfredsen *et al.* (2021) y Brischke *et al.* (2021a y 2021b), en el que para el pino silvestre se proponían valores de  $k_{wa}$  entre 1,0 y 1,13 y para el pino radiata de 0,92. Sin embargo, el valor de  $k_{wa}$



correspondiente al castaño en el trabajo de Conde *et al.* (2021) resulta ser superior (1,84) al propuesto por Alfredsen *et al.* (2021) y Brischke *et al.* (2021a y 2021b) (1,27). Probablemente esto sea debido al efecto especie más intenso que se produce con las maderas más impermeables cuando los fenómenos de lluvia son esporádicos. Esto ocurre en el caso del trabajo de Conde *et al.* (2021) llevado a cabo con climas peninsulares, en el que para el castaño en la estación de Llames se da el valor de  $k_{wa}$  de 1,85 (clima húmedo y costero), en Huelva de 3,1 (clima seco y costero) y en Madrid 2,7 (clima seco). Este efecto cruzado especie-clima complica la posibilidad de obtención de valores de  $k_{wa}$  con validez general.

Tanto en el caso de los trabajos de Brischke *et al.* (2014) como en los de Conde *et al.* (2021) el efecto de la especie implica no solo el diferente efecto de su anatomía en la capacidad de absorción o eliminación de agua sino, también, el de su distinta susceptibilidad a la formación de fendas. Sobre el efecto de las fendas no existe una opinión común, ya que si bien Meyer-Veltrup *et al.* (2016), trabajando sobre abeto rojo encontró un efecto menor y no significativo en el contenido de humedad, Osawa *et al.* (2019), trabajando sobre secuoya (*Sequoia sempervirens*) y cedro japonés (*Cryptomeria japonica*), demostraron que fendas de más de 20 mm de profundidad incrementaban el riesgo de pudrición.

### 3.2. Contribución española al estado del arte

La contribución española en el ámbito del comportamiento funcional de la madera al exterior fuera del contacto con el suelo ha gravitado alrededor de dos proyectos ejecutados en el grupo de investigación de madera y corcho del INIA-CIFOR con colaboraciones de las universidades de Córdoba, Valladolid, Huelva y Politécnica de Madrid, así como con diferentes asociaciones técnicas del ámbito de la madera. Los dos proyectos de investigación son:

1. Determinación de las curvas resistencia eléctrica-humedad para diversas maderas y el corcho, Proyecto RTA2008-00005-00-00, desarrollado entre 2008-2012
2. Evaluación del comportamiento funcional de la madera maciza en condiciones de uso exterior sin contacto con el suelo, Proyecto BIA2013-42434-R, desarrollado entre 2014-2017 y con posterior actividad de seguimiento de los dispositivos experimentales instalados en diferentes localidades nacionales.

El objetivo principal del primer proyecto era optimizar los sistemas de medida del contenido de humedad de la madera. Para ello se desarrollaron en primer lugar, las curvas que relacionan la resistencia eléctrica con el contenido de humedad en 10 maderas de frondosas (Fernández-Golfín *et al.*, 2012). Con este primer trabajo se obtuvieron las curvas de calibración correspondientes al castaño americano (*Castanea dentata*), al roble blanco americano (*Quercus alba*), al roble rojo (*Quercus rubra*), al cerezo (*Prunus serotina*), al fresno europeo (*Fraxinus sp.*), al haya europea (*Fagus sylvatica*), al roble blanco europeo (*Quercus robur*), al iroko (*Chlorophora excelsa*), a la limba (*Terminalia superba*) y a la samba (*Triplochiton scleroxylon*); maderas todas ellas muy presentes en los mercados nacional y europeo.

Un segundo resultado de este primer proyecto fue el diseño de un dispositivo emulador de contenido de humedad (patente nº 201231670) que permitía la calibración y/o verificación de los equipos de medida del contenido de humedad de la madera por resistencia eléctrica en quince maderas (las diez frondosas anteriores más cinco adicionales, cuatro de ellas coníferas).

Un tercer resultado (Fernández-Golfín *et al.*, 2014) fue la determinación de las curvas patrón Resistencia eléctrica-contenido de humedad, necesarias para la estimación del contenido de humedad en madera termotratada de pino radiata. Resultaba de gran importancia poner a punto los sistemas de medida con este producto innovador ya que

existía un creciente interés por él en el mercado, unido al hecho de que el pino radiata era de producción nacional.

Un cuarto resultado de este proyecto (Conde *et al.*, 2021c) fue la publicación de las curvas de calibración interna correspondientes a cuatro coníferas muy presentes en el mercado nacional y europeo de productos de la construcción: Pino silvestre (*Pinus sylvestris*), Pino laricio (*Pinus nigra*), Pino negral (*Pinus pinaster*) y Pino radiata (*Pinus radiata*).

Con esto fue posible estimar el contenido de humedad de la madera con una precisión del  $\pm 1,0\%$ , mejorando el  $\pm 3,0\%$  reportado hasta entonces para la técnica de medida por resistencia eléctrica (Forsén y Tarvainen, 2000) y, con ello, optimizar la medida de los sistemas de monitorización que se emplearon en la implementación del segundo de proyecto.

Con la ejecución de este segundo proyecto (BIA2013-42434-R) se daba comienzo en España con los trabajos de caracterización funcional de la madera al exterior y con los de modelización de su comportamiento en climas nacionales. Este trabajo se llevó a cabo de acuerdo con la metodología propuesta por Thelandersson *et al.* (2011) y en el seno de la COST Action FP 1303.

En este contexto, fueron desplegados siete dispositivos experimentales en diferentes localidades peninsulares (Figura 9), elegidas teniendo en cuenta los climas nacionales más representativos, reflejados en función de su distinto índice Scheffer. Una descripción de su instalación y características puede leerse en Conde *et al.* (2021).

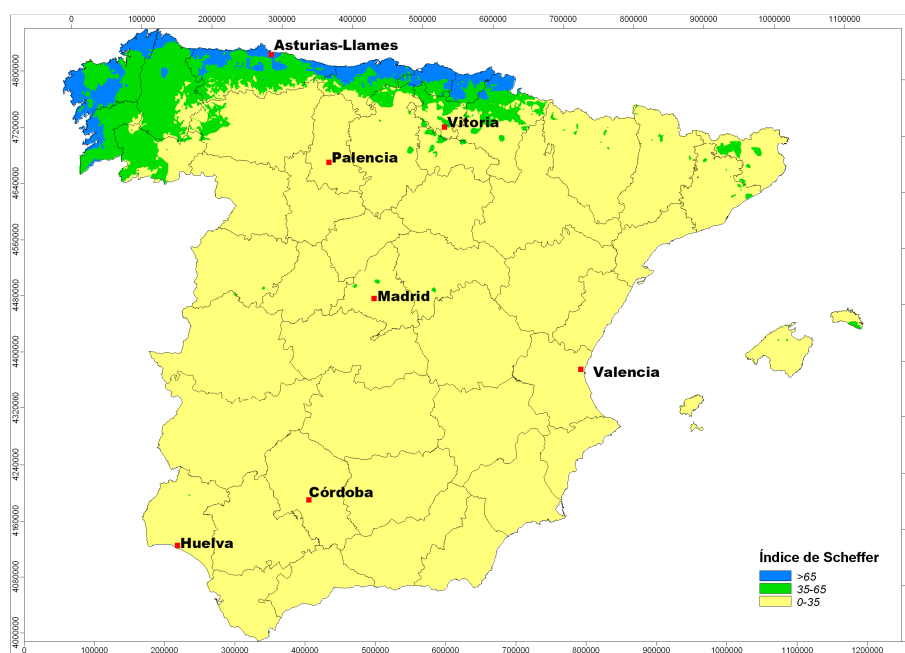


Figura 9. Ubicación de los dispositivos experimentales (Conde *et al.*, 2021).

En un primer trabajo (Fernández-Golfín *et al.* 2016) se llevó a cabo una clasificación territorial del riesgo de pudrición sobre la base del empleo de índice Scheffer, aunque los dispositivos experimentales anteriormente mencionados todavía no ofrecían datos de utilidad para la modelización. En este trabajo no sólo se empleó el índice Scheffer en su formulación y clasificación tradicional (ecuación [16]) sino, también, un índice Scheffer modificado con la incorporación del efecto de las condensaciones, quedando formulado como sigue:

$$SCI2 = \sum_{ene}^{dic} \frac{(T-2) \cdot ((D+N \cdot C)-3)}{16.7} \quad [21]$$

Donde D es el número medio de días al mes con lluvia superior o igual a 0,2 mm y T es la temperatura media mensual en °C. En la expresión [21] se incrementa el efecto de la lluvia con una fracción (N) del número de días en los que hace acto de presencia las condensaciones y/o las escarchas (C). El valor de N fue establecido empíricamente, y de forma provisional, en 0,6. En la figura 8 también puede verse reflejada la distribución territorial según el valor del índice Scheffer (SCI1). Los valores calculados del SCI1 oscilaron entre 7 (Almería) y 95 (San Sebastián) y los del SCI2 entre 17 (Almería) y 131 (Bilbao). En ocho capitales de provincia estos autores comprobaron que la diferencia entre ambos índices  $SCI2-SCI1 > 40$ , señal de un acusado efecto de las condensaciones.

En su trabajo, Fernández-Golfín *et al.* (2016) sugirieron modificar los intervalos de clasificación del riesgo inicialmente considerados por Scheffer para así integrar el efecto de las condensaciones, dejándolos como sigue:

- 0 - 35: Bajo riesgo de pudrición
- 36-70: Riesgo medio de pudrición
- 71-100: Alto riesgo de pudrición
- >100: Riesgo extremo de pudrición (normalmente asociado con una alta frecuencia de lluvia y condensaciones)

Los autores también sugirieron el criterio de asignar las localidades con  $IS2 > 100$  a clase de uso 4 de la norma europea EN 335 aunque el material no estuviera en contacto con el suelo.

En este trabajo los autores también analizaron las razones por las cuales en cada localidad se producían los valores del índice Scheffer obtenidos y para ello relacionaron estos índices con las severidades climáticas de verano (SCS) e invierno (WSC) del Código Técnico de la Edificación español (Ministerio de Fomento, 2009). Los modelos propuestos para las localidades costeras [22] e interiores [23] fueron los siguientes:

$$IS1 = 87.5517 - 53.4837 \cdot SCS \text{ para localidades costeras (R}^2 = 85,1\%) \quad [22]$$

$$IS1 = 111.396 - 42.2681 \cdot SCS - 38.497 \cdot WSC \text{ para localidades de interior (R}^2 = 65,2\%) \quad [23]$$

La expresión [22] hace ver que el valor de índice Scheffer en las localidades costeras viene únicamente condicionado por la severidad del verano, probablemente debido a que en las zonas costeras españolas las temperaturas invernales son más suaves (temperaturas medias siempre por encima del nivel de inhibición de la actividad fúngica de 2°C) y el nivel de humedad en la madera es relativamente alto y constante durante todo el invierno (por efecto de una humedad relativa alta y constante) de manera que la actividad fúngica, estimada por el índice de Scheffer tradicional (IS1), se mantiene estable durante todo el invierno. Esto supone que el riesgo resulta ser inferior en aquellas zonas costeras cuyo verano sea más largo, seco y con temperaturas más altas.

Por el contrario, la función [23] aplicable a las localidades de interior indica que el riesgo de pudrición en estas zonas depende tanto de la severidad del invierno como del verano. Para determinar mejor la causa de este comportamiento, los autores relacionaron el contenido de humedad de equilibrio (EMC) de cada capital de provincia con su insolación (I, número de horas de insolación por mes, valores obtenidos en Agencia Estatal de Meteorología - AEMET, 2010), derivando la expresión [24]:

$$EMC = 19,5822 - 0,0323495 * I \quad (R^2 = 83,7\%) \quad [24]$$

La expresión [24] pone en evidencia que es el grado de insolación relativa el factor que mayor impacto tiene en la reducción del riesgo de pudrición en las zonas de interior, probablemente debido a que la temperatura no es un factor limitante para el desarrollo de la actividad fúngica (valores medios por encima de 2°C) y que el alto grado de insolación relativa conduce a un secado más intenso, a la vez que tiene una relación negativa con la pluviosidad.

Respecto del parámetro de insolación, los autores concluyen que es fundamental prestar atención a la forma de distribución anual del nivel de insolación, ya que la presencia de altos niveles de insolación repartidos a lo largo del año conducen a un menor riesgo de pudrición (valores de SCI1 reducidos) pero altos niveles de insolación concentrados en un número reducido de meses (generalmente en verano) generan agrietamiento o atejado de la madera intensos (por mayor variación anual de los valores de EMC), lo que conduce a un incremento de la capacidad de retención de agua y a un tiempo de humectación más elevado y, como consecuencia, a una pudrición más rápida.

La no disponibilidad de criterios claros para la asignación de las clases de uso de la norma EN 335 y el todavía incipiente grado de implantación de los modelos dosis-respuesta citados en el apartado 1, llevó en 2018 a proponer (Fernández-Golfín *et al.* 2018) una guía para la asignación de clases de uso y servicio que diera respuesta a las crecientes demandas de los proyectistas con madera.

En este trabajo Fernández-Golfín *et al.* (2018) propusieron la asignación del índice básico de exposición para la madera en función de su ubicación, de acuerdo con los siguientes criterios:

- a) Para la madera expuesta al exterior, pero no en contacto con el suelo, en función del valor calculado del índice Scheffer, con el siguiente criterio (Tabla 3):

Tabla 3. Criterio de conversión del valor del índice Scheffer en valor del índice de exposición básica ( $I_{so}$ ).

Valor calculado del índice Scheffer modificado	Calificación de la estación	Índice de exposición básica $I_{so}$
$IS \leq 35$	Seca	3,0
$35 < IS \leq 70$	Húmeda	3,3
$70 < IS \leq 100$	Muy húmeda	3,5
$IS > 100$	Extremadamente húmeda	3,7

- b) Para la madera ubicada en el interior de los edificios sin envolvente térmica, en función de los valores del contenido de humedad medio anual ( $MC_{MED}$ ) y mensual ( $MC_{MES}$ ) así como del número de meses en los que el valor del  $MC_{MES}$  se sitúa en determinados intervalos. De acuerdo con el siguiente criterio:

- Por el valor de la media anual de la humedad de equilibrio de la madera ( $CHMED$ )
  - $\leq 12\%$ : 1 punto
  - $12\% < CHMED \leq 18\%$ : 2 puntos
  - $> 18\%$ : 3 puntos
- Por cada mes en el que la media mensual de la humedad de equilibrio de la madera ( $CHMES$ ) se sitúe en el intervalo:
  - $< 10\%$ : restar 0,15 puntos
  - $> 18\%$ : sumar 0,30 puntos
- Valor del índice ( $I_{so}$ ): Suma de los anteriores

Este criterio llevaba a que el valor del índice ( $I_{s0}$ ) entre capitales de provincia variase entre 0,4 (Córdoba, Toledo, Cáceres, Granada, Madrid) y 2,3 (Lugo).

- c) Para madera ubicada en el interior de edificios dotados de envolvente térmica, en función de la clasificación de higrometría del espacio interior según lo establecido en la norma ISO 13788 y de acuerdo con el criterio de la Tabla 4.

Tabla 4. Valores del índice de exposición básica a emplear en elementos ubicados en el interior de edificios dotados de envolvente térmica en función de su Clase de higrometría interior.

Clase de higrometría interior	$I_{s0}$
1. Espacios desocupados y almacenes de bienes secos	1,0
2. Espacios habitables destinados a oficinas y comercios con una ventilación y ocupación normales	1,0
3. Espacios habitables con carga higrométrica interna baja	1,0
4. Espacios habitables y no habitables con carga higrométrica interna alta	2,0
5. Espacios habitables y no habitables con carga higrométrica interna muy alta	3,0
Nota 1. El empleo de las clases de higrometría 1 a 4, ambas incluidas, queda circunscrito a aquellas aplicaciones en las que se pueda excluir totalmente la presencia de condensaciones.	
Nota 2. En clase higrométrica 4 también serán incluidos todos los materiales de cubierta y fachada que estando ubicados al exterior del aislamiento térmico estén protegidos del clima exterior por una barrera impermeabilizante.	

Con todos estos valores del índice básico de exposición, los autores propusieron emplear el modelo de Thelandersson *et al.* (2011) para la determinación del índice característico de exposición (expresión [2])

$$I_{Sk} = I_{s0} * k_{s1} * k_{s2} * k_{s3} * k_{s4} * C_a \quad [2]$$

Como valores de los distintos coeficientes  $k_{si}$  los autores propusieron el mismo sistema de Thelandersson *et al.* (2011) puntualmente modificado en aquellos aspectos sobre los que existía una mejor evidencia empírica. Como valor de  $C_a$  adoptaron la unidad.

Para conseguir una aplicación más eficaz y sencilla de esta metodología, los autores diseñaron una herramienta informática, en forma de hoja de cálculo Excel, donde el proyectista puede ir incorporando los valores de las variables inherentes a la ubicación ( $I_{s0}$  y  $k_{s1}$ ) y el diseño ( $k_{s2}$ ,  $k_{s3}$ ,  $k_{s4}$ , etc.), obteniendo un valor final del  $I_{Sk}$  y asignar una clase de uso en función del criterio aplicado según la Tabla 5. Esta herramienta puede ser usada en cualquier condición de uso de la madera, viniendo acompañada de una guía interna para la correcta aplicación de los factores  $k_s$ . Esta herramienta ha sido aplicada, con éxito, desde 2018 en innumerables ocasiones, habiéndose enriquecido con los comentarios recibidos de los usuarios. En la Figura 10 se recoge el aspecto de la pantalla principal.

Tabla 5. Criterios de asignación de clases de uso en función del valor calculado del índice característico de exposición.

Asignación de clases de uso	
Índice característico de exposición ( $I_{sk}$ )	Clase de uso (UNE-EN 335)
0-1,5	1
>1,5 hasta 2,5	2
>2,5 hasta 3,5	3.1
>3,5 hasta 4,5	3.2
>4,5	4*

(\* ) En el caso de medio marino sería CU5

Este enfoque eminentemente práctico para la determinación del riesgo de pudrición y el nivel de protección exigible en función de la ubicación y el diseño fue propuesto para su aplicación en España hasta no disponer de una más amplia evidencia científica sobre el valor de referencia de la dosis crítica ( $D_{crit}$ ) y de los factores de modificación de la misma ( $K_{wa}$  y  $K_{inh}$ ).

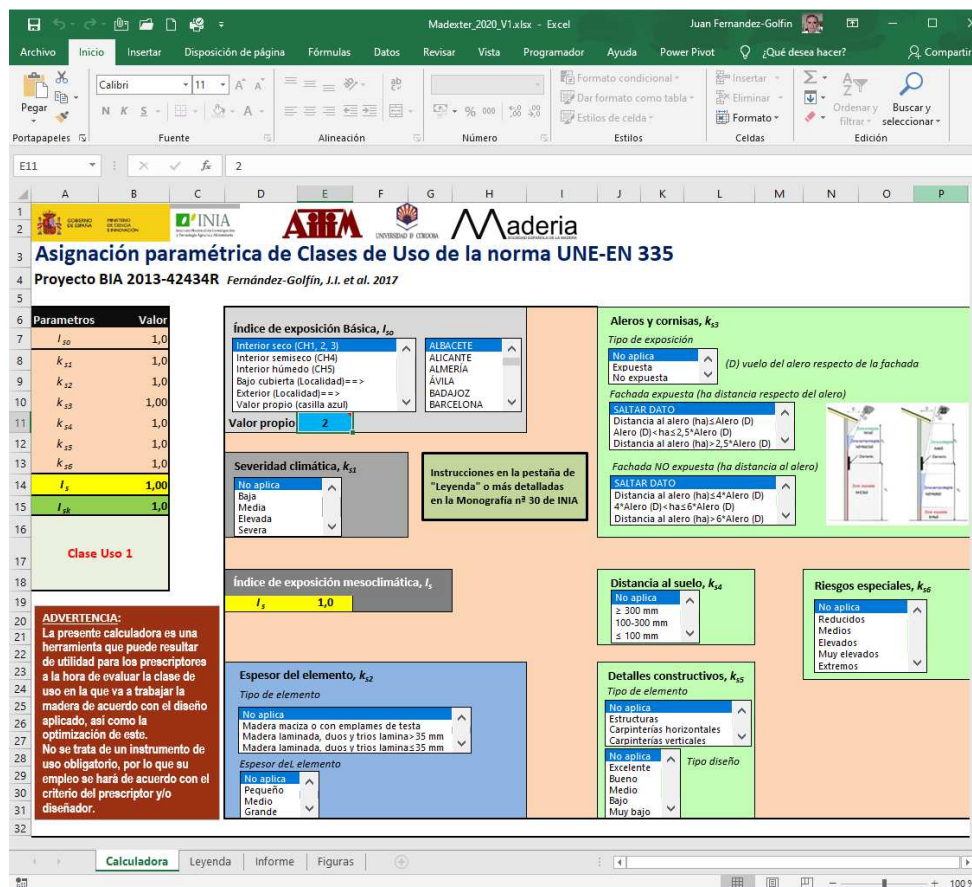


Figura 10. Detalle de la herramienta de asignación de clases de uso.

Para avanzar en la comprobación del efecto del diseño ( $k_{si}$ ) sobre del índice básico de exposición ( $I_{50}$ ), necesarios ambos para la determinación del índice característico de exposición ( $I_{sk}$ ), y confirmar los valores inicialmente considerados por Thelandersson et al. (2011), posteriormente modificados empíricamente por Fernández-Golfín et al. (2018); Conde et al. (2021b) analizaron el efecto de los aleros ( $k_{s3}$ ), de la distancia al suelo ( $k_{s4}$ ) y de la disposición relativa en el factor diseño ( $k_{s5}$ ).

Conde *et al.* (2021b), trabajando sobre un dispositivo experimental ubicado en Madrid (INIA-CSIC), extrajeron las siguientes conclusiones:

1. Las variables que mejor explican la evolución anual del contenido de humedad en los diferentes puntos del montaje experimental son la temperatura y la precipitación superior a 5,0 mm.
2. El efecto reductor del riesgo de pudrición por la protección aportada por aleros ( $k_{s3}$ ) queda cuantificado en 0,8, con respecto a los elementos totalmente expuestos en posición vertical. El resultado obtenido confirma el valor empírico publicado en las guías de diseño constructivo de Thelandersson *et al.* (2011), Isaksson *et al.* (2015) y Jermer *et al.* (2011).
3. El efecto incrementador del riesgo como consecuencia de la distancia al suelo ( $k_{s4}$ ) también ha sido cuantificado, adoptando para el clima de Madrid el valor de 1,4 para distancias respecto del suelo inferiores o iguales a 200 mm. Este valor de 1,4 resulta ser muy inferior al reflejado en las guías de diseño constructivo de Thelandersson *et al.* (2011), Isaksson *et al.* (2015) y Jermer *et al.* (2011), probablemente debido a las características del clima de Madrid (más seco, más cálido y con menor fuerza de lluvia). Por ello los autores sugieren la necesidad de llevar a cabo más investigaciones para evaluar la variación de este factor con la distancia al suelo y con las características del clima local. Por tanto, los autores afirman que no queda acreditado el valor de la altura a partir de la cual el riesgo se anula (factor 1,0) y empieza a ser de naturaleza reductora ( $<1,0$ ).
4. Respecto del efecto de la posición relativa de los elementos de madera (parte integrante del factor de diseño,  $k_{s5}$ ) en la modificación del riesgo básico, los autores concluyen que, para un elemento colocado verticalmente, se puede utilizar un factor de reducción de 0,7 (el valor de  $I_{s0}$  está determinado para un elemento dispuesto horizontalmente). Esta diferencia de comportamiento significa que la asignación de clases de uso en muchas ubicaciones geográficas puede variar para los elementos de madera de uso externo dependiendo de si están colocados vertical u horizontalmente.

En otro trabajo, estos mismos autores (Conde *et al.* 2021a), también analizaron experimentalmente el efecto de la especie (factor  $k_{wa}$ ) en la modificación de la resistencia crítica ( $D_{crit}$ ) de la expresión [18] empleada para calcular el valor característico de la Resistencia ( $D_{RD}$ ).

$$D_{RD}=D_{crit}*k_{wa}*k_{inh} \quad [18]$$

Estos autores llevaron a cabo su análisis comparando el comportamiento de los siete tipos de madera colocados en los dispositivos experimentales ubicados en diversos puntos de la geografía nacional.

De acuerdo con los resultados experimentales obtenidos, los autores propusieron valores para el efecto especie ( $k_{wa}$ ) de 1,0 para las coníferas, de 1,84 para el castaño y de 2,51 para el eucalipto. Estos valores se establecen de forma relativa respecto del comportamiento de la madera de referencia, el abeto rojo (*Picea abies*).

Con respecto a la contribución de las fendas en el valor del  $k_{wa}$ , estos autores la consideraron mínima e indistinguible del efecto especie, ya que, excluyendo las localizaciones costeras, en las de interior el nivel de fendado era muy similar, por lo que las diferencias en el comportamiento de las distintas especies ubicadas en estas localizaciones solo pueden deberse a las diferencias en la capacidad de humectación / secado.

## 4. RESUMEN GLOBAL DE RESULTADOS

---

### 4.1. Optimización de los sistemas de monitorización del clima del material

#### 4.1.1. Introducción

La vida útil de los elementos de madera presentes en las edificaciones está influenciada por numerosos factores, tanto con origen en las propiedades inherentes de las maderas (p. ej. durabilidad natural y conferida) y productos de acabado empleados como en las variables ambientales que afectan al material.

Los estudios de campo efectuados, tanto los diseñados específicamente para obtener datos de la evolución de la degradación en función del tiempo y las variables intervinientes, como los de seguimiento del estado de conservación de las construcciones en madera en servicio, han puesto claramente de manifiesto que el clima específico del sitio puede tener una influencia esencial y variable en la vida útil de los elementos de madera y que, por tanto, las variables climáticas son de obligada consideración cuando se trata de evaluar la durabilidad.

Pero en el clima meteorológico al que están sometidos los elementos de madera en servicio es necesario considerar tres niveles diferentes: el macroclima (descrito por los datos meteorológicos del sitio), el mesoclima (descrito por influencias que son provocadas por la situación ambiental en el sitio, p. ej. ubicación de la construcción en umbría, a sotavento, totalmente expuesta) y el microclima (descrito por la situación ambiental dentro de la construcción en las cercanías del elemento de madera).

La afección del clima meteorológico en la degradación de la madera por hongos se produce a través de la inducción de un determinado clima en el material, caracterizado por su contenido de humedad y su temperatura. Sólo cuando el clima meteorológico es capaz de inducir un clima en el material apto para el desarrollo de los hongos éstos son capaces de degradar el material, no antes. Por tanto, cualquier proceso de estudio y modelización de la pudrición de la madera ha de pasar necesariamente por conocer y relacionar entre sí las variables climáticas, tanto de tipo meteorológico (temperatura, precipitación, humedad relativa, insolación, etc.) como del material (su contenido de humedad y temperatura), y el estado de conservación de los elementos de madera.

El estado de conservación de los elementos de madera se mide de acuerdo con la metodología establecida en la norma EN 252, que exige observación visual. El clima meteorológico, tanto a macro como a meso escala, se conoce a través de las Agencias nacionales de meteorología, pero el microclima y el clima del material han de ser medidos *in situ* mediante dispositivos apropiados.

Para la medición de las variables inherentes al clima meteorológico existe una tecnología muy probada y experimentada, sin embargo, no ocurre lo mismo en lo referente a la medición de las variables inherentes al clima del material (contenido de humedad y temperatura). La temperatura de la madera suele ser medida mediante la inserción de sensores resistivos (RTD), específicamente diseñados para ese fin (por su tamaño y resistencia a la corrosión), en un orificio practicado en la madera. Para determinar el contenido de humedad de la madera (en adelante MC) se pueden distinguir dos enfoques generales: a) Mediciones en laboratorio, donde el MC se determina mediante el uso de estufas, de acuerdo con las normas internacionales (EN 13183-1) y b) Mediciones en servicio, donde el MC generalmente se estima mediante métodos de medición indirecta que utilizan las propiedades físicas de la madera que están correlacionadas con el MC. Los métodos de medición indirectos y no destructivos incluyen los métodos capacitivos, de resistencia eléctrica, microondas, radiométricos, espectrométricos, de sorción y de



reacción. Se puede consultar una revisión completa de los métodos para medir el MC en Dietsch *et al.* (2015a) y Engelund Thybring *et al.* (2018).

El método denominado de resistencia eléctrica es el más utilizado, tanto en el seguimiento del MC de la madera en servicio, como del MC de la madera en los procesos industriales de secado llevados a cabo en los aserraderos. También es muy empleado en los procesos de evaluación de la conformidad de la calidad del material (en lo que hace referencia a su humedad) tanto a su recepción en obra como en taller y/o proceso de elaboración, así como en los procesos de inspección.

Los medidores de humedad de tipo dieléctrico, radiométrico y espectrométrico se utilizan principalmente en líneas de producción para proporcionar mediciones en línea y sin contacto, no siendo de utilidad en los procesos de evaluación del MC de la madera en servicio.

Por tanto, para monitorear el MC de las estructuras de madera en servicio y evaluar esta variable en los dispositivos experimentales diseñados para la obtención de modelos descriptivos de la cinética de la degradación de la madera, el método más utilizado y confiable es el de resistencia eléctrica. Entre las razones para llegar a esta conclusión se citan: su precisión aceptable, la posibilidad de medición localizada (exactamente en el punto más desfavorable del elemento de madera), la durabilidad y rápida respuesta de los sensores de humedad en condiciones ambientales cambiantes, la facilidad de conexión de los dispositivos de medición a los sistemas de registro de datos y el daño limitado a la estructura. Sin embargo, es necesario lidiar con el problema de mantener un contacto estrecho, en el tiempo, entre los sensores de clavija y la madera en ciertos lugares donde los cambios dimensionales de la madera son extremos.

Un aspecto muy importante a tener en cuenta sobre esta tecnología es su precisión, ya que las curvas internas de calibración, -que cada equipo incorpora para relacionar las mediciones de la resistencia eléctrica con el MC real-, corresponden a una única especie. Siguiendo las recomendaciones incluidas en la norma EN 13183-2 se tendrá en cuenta el efecto de otros factores relacionados con la metodología de medición.

Forsén y Tarvainen (2000) llevaron a cabo un extenso estudio sobre la precisión de los medidores de contenido de humedad de madera portátiles que funcionan no solo de acuerdo con el método de tipo resistencia sino también con el método de tipo capacitancia. Llegaron a la conclusión de que la mayoría de los medidores de resistencia mostraban una desviación sistemática del MC respecto del valor real determinado en estufa, debido al empleo de curvas internas de calibración incorrectas. Según estos autores, la precisión de los medidores de tipo resistencia (intervalo de confianza del 95%) para las mediciones *in situ* es de aproximadamente  $\pm 2,0$  a  $\pm 5,0$  grados porcentuales de MC (%) y aproximadamente de  $\pm 3,0\%$  a  $\pm 5,0$  grados porcentuales de MC (%) para los medidores de capacitancia. En este sentido, la fuente más importante de error cuantitativo en los medidores de tipo resistencia está asociada con el diferente efecto de las especies de madera seguido del efecto de la temperatura del material. De acuerdo con esto, las mediciones de MC por resistencia deben compensarse por la variación causada por la especie y la temperatura de la madera. Estos autores proporcionaron evidencia clara del hecho de que sólo los medidores que puedan ofrecer suficiente precisión (consideraron que debía ser que más del 55% de las lecturas estuvieran dentro del 1% del valor real obtenido mediante el método de estufa) deben usarse para fines de control de calidad contractual.

Todos los medidores de tipo resistencia estiman el valor del MC en función de curvas internas de calibración (que relacionan la resistencia eléctrica con MC), de aplicación para las diferentes especies. Sin embargo, la gran mayoría de los aparatos comerciales incorporan una única curva interna de calibración con la que obtienen un primer valor del MC, que luego es internamente modificado por el efecto de la especie y la temperatura. Por otra parte, dada la gran multiplicidad de métodos existentes para corregir el efecto de la

especie, los instrumentos producidos por diferentes fabricantes también muestran diferentes lecturas cuando se aplican a un mismo material de madera.

Un ejemplo de esta diferencia la reportó Vermaas (1982), quien informó que la mayoría de los medidores de humedad que empleó, no proporcionaron la precisión requerida cuando fueron usados en madera de pino de Monterrey (*Pinus radiata*) y marítimo (*P. pinaster*) cultivados en Sudáfrica debido a una corrección inadecuada del efecto de las especies de madera. Sólo mediante el uso de las funciones de calibración específicas de cada madera, o mediante el empleo de sistemas de corrección de especies adecuados, la precisión de la estimación del MC puede alcanzar valores mejores que el  $\pm 3\%$  exigido por la norma EN 14081-1 y el Reglamento de Productos de la Construcción (Comisión Europea, 2011. Reglamento Europeo 305/2011).

La literatura contiene diferentes expresiones que describen la relación entre la resistencia eléctrica y el MC pero la mayoría de ellas se refieren a especies no europeas. Uno de los últimos y más extensos estudios realizados sobre especies autóctonas europeas (coníferas, frondosas y maderas modificadas) es el de Brischke y Lampen (2014), quienes propusieron una relación funcional entre la resistencia eléctrica medida y el MC gravimétrico (estufa) en un rango limitado entre 15 % y 50% de MC. Mediante el uso de las funciones de calibración específicas propuestas, la precisión de la estimación de MC de las medidas estuvo entre  $\pm 2,5\%$  y  $\pm 5\%$ , lejos del objetivo de  $\pm 1\%$  establecido por Forsén y Tarvainen (2000) y mejor que el  $\pm 3\%$  considerado por la norma EN 14081-1: 2020.

En los trabajos que se presentan en este apartado se empleó el modelo matemático propuesto por Samuelsson (1990) para relacionar entre sí la resistencia eléctrica medida con el MC, no solo por su demostrada viabilidad predictiva (buen ajuste) sino también, por la ventaja que suponía poder comparar los resultados obtenidos con los del extenso estudio realizado por Forsén y Tarvainen (2000). Estos autores emplearon el mismo modelo y lo aplicaron sobre un número elevado de especies europeas, algunas de ellas comunes (pino silvestre y pino marítimo) a las de nuestros trabajos, aunque de diferente origen. Esta metodología permitió mejorar los modelos propuestos por Forsén y Tarvainen (2000) en las especies comunes (al incorporar más procedencias del material) y contar con una amplia colección de curvas obtenidas todas ellas con la misma metodología y modelos matemáticos de ajuste.

En los trabajos (publicaciones y patente) presentados en este apartado, se integran 14 maderas (10 frondosas y 4 coníferas), que son las que se encuentran con más frecuencia tanto en estructuras como en carpinterías o acabados en madera a nivel nacional y europeo.

Las curvas obtenidas mediante estos trabajos fueron empleadas para la modificación del proceso interno de conversión de medidas de los equipos utilizados para la monitorización del contenido de humedad y la temperatura de la madera en servicio (trabajos incluidos en los apartados 4.3 y 4.4 de este documento). Los equipos de medida seleccionados para llevar a cabo la monitorización del clima del material fueron los fabricados por Scanntronik (<https://www.scanntronik.de/>), estando integrados por un *datalogger* (Thermofox) y un medidor de contenido de humedad de ocho canales (Gigamodule), así como por un conjunto de 8 pares de sensores tipo clavo (de Gann) y un sensor de temperatura tipo RTD insertados en las maderas y unidos entre sí mediante cables apantallados con conexiones tipo BNC.

El emulador de humedad de madera, objeto de la patente incluida en este trabajo, fue empleado para la verificación de la calidad de las medidas efectuadas por el equipo de medida seleccionado. Todos los aparatos instalados en los dispositivos experimentales incorporaron en su canal 8 una resistencia calibrada que permitía la verificación continua de la calidad de la medida de resistencia tomada por el aparato.

#### 4.1.2. Contribución al estado del arte

Los tres trabajos de investigación aportados y la patente coparticipada por la candidata han permitido mejorar la precisión de la estima (error de estima inferior a  $\pm 1\%$ ) del contenido de humedad en quince tipos de madera de uso habitual en el mercado de la construcción, la carpintería y el mobiliario en España y Europa.

Estas especies son:

- 1). Haya europea (*Fagus sylvatica* L.)
- 2). Roble blanco europeo (*Quercus robur* L.)
- 3). Roble blanco americano (*Quercus alba* L.)
- 4). Roble rojo americano (*Quercus rubra* L.)
- 5). Fresno americano (*Fraxinus americana* L.)
- 6). Castaño americano (*Castanea dentata* Borkh. (Marshall))
- 7). Iroko (*Chlorophora excelsa* (Welw.) Benth)
- 8). Cerezo americano (*Prunus serótina* Ehrh.)
- 9). Limba (*Terminalia superba* Engl. & Diels.)
- 10). Samba/Obeche (*Triplochiton scleroxylon* K. Schum.)
- 11). Pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.)
- 12). Pino radiata (*Pinus radiata* D. Don)
- 13). Pino radiata termotratado
- 14). Pino laricio (*Pinus nigra* J.F. Arnold)
- 15). Pino marítimo (*Pinus pinaster* Aiton)

Además de estas especies, la candidata coparticipó en una comunicación a Congresos (número 4) en la que se publicaron las curvas internas de calibración de dos especies adicionales:

- 16). Eucalipto blanco (*Eucalyptus globulus* Labill.)
- 17). Castaño europeo (*Castanea sativa* Mill.)

Todos estos trabajos se llevaron a cabo en el seno del proyecto del Plan sectorial del INIA RTA2008-00005-00-00 (2008-2012), de *Determinación de las curvas resistencia eléctrica-humedad para diversas maderas y el corcho*.

#### 4.1.3. Resumen de los trabajos

##### 4.1.3.1. Metodología

La metodología de selección, acondicionamiento y medición fue la misma en todos los trabajos presentados en este apartado.

##### Material de ensayo y acondicionado

Los modelos fueron inicialmente desarrollados empleando 36 probetas de madera de 50x50x20 mm<sup>3</sup>, seleccionadas aleatoriamente entre las obtenidas de 12 tablones de madera de cada especie procedentes de 4 localizaciones distintas.

El colectivo de 36 probetas fue inicialmente acondicionado a  $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$  y  $65 \pm 5\%$  HR durante tres semanas, pasadas las cuales fue subdividido aleatoriamente en cuatro subgrupos. Cada subgrupo de cada especie, integrado por nueve probetas, fue acondicionado hasta masa constante (pérdida diaria de masa  $\leq 0.1\%$ ) a  $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$  en alguna de las siguientes condiciones de humedad relativa:  $40 \pm 5\%$ ,  $65 \pm 5\%$ ,  $80 \pm 5\%$  o  $90 \pm 5\%$  HR (Figura 11).



Figura 11. Probetas de ensayo utilizadas en el estudio (*P. pinaster*, *P. radiata*, *P. nigra* y *P. sylvestris*) bajo las siguientes condiciones de temperatura y HR: arriba-izquierda 20/65; arriba-derecha 20/40; abajo-izquierda 20/80 y abajo-derecha 20/90.

Para comprobar y evaluar la precisión de los modelos desarrollados con la primera muestra, se empleó una segunda muestra compuesta por diez probetas, por especie y condición climática, de idénticas dimensiones a las de la muestra inicial. Las probetas de esta segunda muestra fueron acondicionadas a  $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$  hasta masa constante, pero en tan solo tres condiciones de humedad relativa:  $40 \pm 5\%$ ,  $65 \pm 5\%$  y  $90 \pm 5\%$ . Con los datos obtenidos en esta segunda muestra se calcularon el error medio y la incertidumbre de medida en cada uno de los tres puntos de humedad considerados.

#### Medida de la Resistencia eléctrica y del contenido de humedad real

Una vez que el material de ensayo alcanzó el equilibrio, se midió la resistencia eléctrica de cada probeta usando un medidor de resistencia AGILENT 4339B (rango 103-1015  $\Omega$ , precisión 0,5%, resolución de pantalla 5 dígitos). En cada ocasión en la que se midió la resistencia eléctrica de la madera, se verificó la capacidad del equipo para medir correctamente utilizando una caja de décadas TINSLEY 4721 (con certificado de calibración externo ISO / IEC 17025: 2017). La verificación se realizó a 100 Gohms.

Las especificaciones de medida fueron las siguientes:

- Voltaje: 10 V
- Temperatura a la que se efectuaron las medidas (laboratorio):  $20 \pm 2^\circ\text{C}$
- Tiempo de retraso de medida: 5 s

Estas especificaciones de medición fueron las utilizadas por Forsén y Tarvainen (2000) en su trabajo, permitiendo así la comparación de resultados. Todas las mediciones eléctricas se realizaron una vez que todas las probetas, en cada una de las condiciones, habían alcanzado el equilibrio de contenido de humedad (variaciones diarias  $\leq 0,1\%$ ).

Como sensores se utilizaron dos electrodos tipo clavija, de acero inoxidable de 10 mm de largo, 2,6 mm de diámetro y con una separación de 28,5 mm. Los electrodos fueron insertados radialmente, es decir, perpendicularmente a los anillos de crecimiento, introduciéndolos desde la sección tangencial y hasta el centro de las probetas. La resistencia eléctrica de la madera se midió en ambas direcciones: paralela a la fibra ( $R_p$ ) (como exige la norma EN 13183-2: 2002) y perpendicular (transversalmente) a la fibra ( $R_t$ ) (Figura 12).



Figura 12. Equipos de medida de la resistencia eléctrica.

Después de completar todas las lecturas eléctricas bajo cada condición climática, todas las probetas fueron retiradas de cada una de las cámaras y pesadas en húmedo (masa húmeda). Posteriormente se secaron en estufa hasta obtener una masa constante a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ , registrando su peso seco (masa anhidra). Con las medidas de masa húmeda y anhidra se calculó el contenido de humedad en % respecto de la masa anhidra.

Esta metodología fue empleada tanto para la primera muestra como para la de control.

#### Análisis estadístico

La función de calibración utilizada en el presente estudio fue la propuesta por Samuelsson (1990, 1992) pero bajo el formato de  $\text{Log} [\text{Log} (R) + 1] = a \cdot h + b$  [1], donde  $R$ , la resistencia eléctrica (en  $\text{M}\Omega$ ), es la variable dependiente y  $h$ , el MC (%) determinado por secado en estufa, la variable independiente.

Con carácter previo a la realización del test ANOVA se comprobó tanto la independencia de los resultados de los ensayos como los supuestos de normalidad (prueba de Shapiro-Wilk) y de homogeneidad de varianza (prueba de Levene) de los datos en las poblaciones de los diferentes grupos en estudio.

#### **4.1.3.2. Resumen de resultados**

La Tabla 6 muestra los coeficientes de regresión ( $a$  y  $b$ ) del modelo de Samuelsson, siendo  $R$  la Resistencia eléctrica (en  $\text{M}\Omega$ ), (variable dependiente) y  $h$  el contenido de humedad real medido mediante el método de estufa (variable independiente).

Tabla 6. Coeficientes de regresión del modelo  $\text{Log} [\text{Log}(R)+1]=a*h+b$ .

Especies	Nº probetas	R medida paralelamente a la fibra (R <sub>p</sub> )			R medida perpendicularmente a la fibra (R <sub>t</sub> )		
		b	a	R <sup>2</sup>	b	a	R <sup>2</sup>
Pino radiata <i>Pinus radiata</i>	36	1,09641	-0,0386893	99,5	1,0891	-0,0377097	99,8
Pino silvestre <i>Pinus sylvestris</i>	36	1,10085	-0,0393615	99,6	1,09305	-0,0380736	99,6
Pino laricio <i>Pinus nigra</i>	36	1,07005	-0,0373651	99,2	1,07715	-0,0373923	99,4
Pino marítimo <i>Pinus pinaster</i>	36	1,08736	-0,0405052	99,6	1,07508	-0,0390621	99,6
Haya europea <i>Fagus sylvatica</i>	36	1,12606	-0,0467220	99,4	1,10730	-0,04428590	99,8
Roble blanco europeo <i>Quercus robur</i>	36	1,07042	-0,0463680	99,4	1,06539	-0,04509180	99,4
Roble rojo americano <i>Quercus rubra</i>	36	1,11785	-0,0455620	99,5	1,10047	-0,04319794	99,4
Roble blanco americano <i>Quercus alba</i>	36	1,16365	-0,0514145	98,9	1,14459	-0,04860170	99,6
Fresno americano <i>Fraxinus sp.</i>	36	1,13545	-0,0515670	99,5	1,14442	-0,05124290	99,7
Castaño americano <i>Castanea dentata</i>	36	1,02940	-0,0393465	98,7	1,04045	-0,03885960	98,9
Iroko <i>Chlorophora excelsa</i>	36	1,33626	-0,0751156	97,9	1,29684	-0,07032720	98,6
Cerezo americano <i>Prunus serotina</i>	27	1,13123	-0,0467145	98,3	1,13424	-0,04590890	98,9
Limba/White afara <i>Terminalia superba</i>	35	1,10629	-0,0480084	99,1	1,09253	-0,04570594	98,8
Samba <i>Triplochiton scleroxylon</i>	19	1,16087	-0,0539734	99,4	1,18220	-0,05520700	99,5
Eucalipto blanco <i>Eucalyptus globulus</i>	36	1,20197	-0,0542200	99,7	-	-	-
Castaño europeo <i>Castanea sativa</i>	36	1,03248	-0,0410970	99,3	1,03037	-0,039832	99,2

#### 4.1.3.3. Principales conclusiones

- 1) El modelo de Samuelsson,  $\text{Log} [\text{Log}(R_x)+1]= a*h+b$ , se ajustó con éxito a los datos experimentales para predecir con precisión el contenido de humedad gravimétrica de la madera en las especies estudiadas.
- 2) El error de estimación máximo esperado es de  $\pm 0,9\%$  (grados porcentuales de MC). Este error máximo está muy por debajo del límite de  $\pm 3\%$ , exigido en el anexo C de la norma armonizada EN14081-1: 2020 e incluso por debajo del considerado óptimo (1%) en el amplio estudio de Forsén y Tarvainen.
- 3) El modelo de Samuelsson, con los coeficientes de regresión propuestos (Tabla 6), será de interés para construir dispositivos de monitoreo del MC más precisos y para mejorar los procesos de calibración/verificación de los medidores de humedad portátiles comúnmente utilizados por la industria de la madera y el sector de la construcción (Figura 13). La Tabla 7 recoge los valores de contenido de humedad real emulados mediante el uso de los modelos de la Tabla 6, y el uso del dispositivo de emulación correspondiente a la patente coparticipada por la candidata.

Tabla 7. Valores de la humedad emulada en función de la especie elegida, del color del terminal y de la dirección de medida del xilohigrómetro para el que se desea verificar/calibrar su medida.

<b>(1) Valores a tomar como contenido de humedad real (emulado)</b>			
<b>Especie</b>	<b>Terminal*</b>	<b>Medida longitudinal</b>	<b>Medida transversal</b>
<b>CONIFERAS</b>			
P. radiata	Verde	20,0	20,3
	Azul	15,6	15,8
	Amarillo	12,4	12,6
	Rojo	10,0	10,2
P. pinaster	Verde	19,4	19,9
	Azul	15,1	15,4
	Amarillo	12,0	12,2
	Rojo	9,6	9,8
P. silvestre	Verde	20,4	20,9
	Azul	15,9	16,2
	Amarillo	12,6	12,9
	Rojo	10,2	10,4
P. laricio	Verde	20,7	20,8
	Azul	15,9	16,0
	Amarillo	12,6	12,7
	Rojo	9,9	10,1
<b>FRONDOSAS</b>			
Castaño europeo	Verde	17,8	18,3
	Azul	13,5	13,9
	Amarillo	10,5	10,8
	Rojo	8,1	8,3
Haya europea	Verde	17,7	18,2
	Azul	13,9	14,2
	Amarillo	11,2	11,4
	Rojo	9,1	9,2
Roble blanco europeo	Verde	16,6	17,0
	Azul	12,8	13,0
	Amarillo	10,1	10,3
	Rojo	8,0	8,1
Roble rojo americano	Verde	17,9	18,5
	Azul	14,1	14,4
	Amarillo	11,3	11,5
	Rojo	9,2	9,3
Roble blanco americano	Verde	16,8	17,4
	Azul	13,4	13,7
	Amarillo	10,9	11,2
	Rojo	9,0	9,2
Fresno americano	Verde	16,2	16,5
	Azul	12,8	13,0
	Amarillo	10,3	10,6
	Rojo	8,5	8,7
Castaño americano	Verde	18,5	19,0
	Azul	14,0	14,5
	Amarillo	10,9	11,3
	Rojo	8,4	8,8
Cerezo americano	Verde	17,8	18,1
	Azul	14,0	14,3
	Amarillo	11,3	11,6
	Rojo	9,3	9,5
Iroko	Verde	13,8	14,2
	Azul	11,4	11,7
	Amarillo	9,8	9,9
	Rojo	8,5	8,5
Limba	Verde	16,8	17,3
	Azul	13,1	13,5
	Amarillo	10,5	10,7
	Rojo	8,5	8,6
Samba	Verde	15,9	16,0
	Azul	12,7	12,8
	Amarillo	10,4	10,5

<b>(1) Valores a tomar como contenido de humedad real (emulado)</b>			
<b>Especie</b>	<b>Terminal*</b>	<b>Medida longitudinal</b>	<b>Medida transversal</b>
	Rojo	8,6	8,8
Eucalipto blanco	Verde	16,6	-
	Azul	13,4	-
	Amarillo	11,1	-
	Rojo	9,3	-
(*) Terminales del dispositivo emulador patentado Verde: 10 Megaohmios Azul: 100 Megaohmios Amarillo: 1.000 Megaohmios Rojo: 10.000 Megaohmios			



Figura 13. Detalle de la caja y cables de conexión del emulador al xilohigrómetro en verificación/calibración.

#### 4.1.4. Contribución del candidato

Durante la ejecución del proyecto RTA2008-00005-00-00, de *Determinación de las curvas resistencia eléctrica-humedad para diversas maderas y el corcho*, en cuyo seno se generaron todos los datos necesarios para el desarrollo de las 17 nuevas curvas de calibración antes citadas, la doctoranda se responsabiliza de la selección y acondicionamiento del material de ensayo, de la medida de la resistencia eléctrica y del contenido de humedad real de las probetas de ensayo. Junto a los directores de la Tesis y restantes miembros del equipo investigador del proyecto, interviene en la conceptualización y desarrollo de los modelos matemáticos propuestos para cada una de las maderas analizadas. La doctoranda realiza además la escritura del artículo [3] del apartado 4.1.5.1 e interviene en la redacción de los artículos [1] y [2], así como en la de la contribución [1] del apartado 4.1.5.2. Junto con los directores de Tesis es cotitular de la patente referenciada en 4.1.5.3.

#### 4.1.5. Artículos y contribuciones efectuadas

En el ámbito de la Optimización de los sistemas de monitorización del clima del material, la candidata presenta las siguientes contribuciones:

**4.1.5.1. Artículos científicos referenciados** (en negrita la candidata, subrayados los directores)

1. **Fernández-Golfín, J.I., Conde García, M., Conde García, M.,** Fernández-Golfín, J.J., Calvo, R., Baonza, M.V., de Palacios, P., 2012. Curves for the estimation of the moisture content of ten hardwoods by means of electrical resistance measurements.



Forest Systems 21(1), 121-127. ISSN: 2171-5068. 2012 IF: 0,342. 57/165-Q2 (SJR) Cat: Forestry. <https://doi.org/10.5424/fs/2112211-11429>

2. Fernández-Golfín, J.I., Conde García, M., Fernández-Golfín, J.J., Conde García, M., Hermoso, E., Cabrero, J.C., 2014. . Effect of temperature of thermotreatment on electrical conductivity of radiata pine timber. Maderas Ciencia y Tecnología 16(1), 25-36. ISSN: 0717-3644. 2014 IF: 0,722. 10/22-Q2 (JCR) Cat: Materials Science, paper&Wood. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2014005000003>
3. **Conde García, M.,** Conde García, M., Fernández-Golfín, J.I., 2021c. Improving the accuracy of wood moisture content estimation in four European softwoods from Spain. Forest Systems. 30(1), e002. ISSN 2171-9845. 2021 IF: 0,322 74/168-Q2 (SJR) Cat: Forestry. <http://dx.doi.org/10.5424//fs/2021301-17798>

#### 4.1.5.2. Contribuciones en Congresos

1. Fernández-Golfín Seco, J.I., Conde García, M., Díez Barra, M.R., Conde García, M., Acuña Rello, L., Torres Álvarez, E., Perea Alonso, E., 2017. Degradación de la madera al exterior fuera de contacto con el suelo: Efecto del clima y de la especie. Comunicación oral en el 7º Congreso Forestal Español. Plasencia, Cáceres, 26-30 de junio de 2017.

#### 4.1.5.3. Patentes

1. Dispositivo para la emulación de la humedad de la madera y procedimiento asociado a dicho dispositivo. Obtentores: Juan Ignacio Fernández-Golfín Seco, María Conde García, José Javier Fernández-Golfín Seco, Marta Conde García. Fecha de concesión: 29/01/2015. Número de patente: 201231670.

## 4.2. Caracterización relativa del riesgo de pudrición empleando el índice climático de Scheffer

### 4.2.1. Introducción

Tal y como se indicó en el capítulo 3 de análisis del estado del arte, para proyectar soluciones constructivas con madera se necesita un sistema objetivo que permita comprobar la durabilidad de las soluciones constructivas y adoptar decisiones sobre la mejor elección de diseños, productos y/o sistemas de protección.

A la hora de caracterizar la carga de degradación que el material va acumulando a lo largo del tiempo con motivo de su exposición al clima exterior imperante en los distintos lugares donde la madera puede ser empleada, ya se analizaron las diversas aproximaciones actualmente existentes, tanto empleando modelos de degradación como índices climáticos. También se analizó en dicho capítulo la problemática que suponía tener que implantar dispositivos experimentales en todos y cada uno de estos lugares y esperar a que dichos dispositivos arrojasen luz, tanto sobre las cargas de degradación acumuladas durante el tiempo de exposición como sobre los valores críticos de dichas cargas que conllevan la aparición de la pudrición. Una forma de acortar el proceso, o por lo menos de concentrarlo territorialmente haciéndolo mucho más económico y accesible, era la de establecer dispositivos experimentales en lugares representativos por su clima y efectuar luego extrapolaciones a nivel territorial. Este proceso lo denominamos caracterización del riesgo de pudrición.

Tal y como se analizó en el capítulo 3, la caracterización del riesgo a nivel territorial puede hacerse tanto en términos absolutos como relativos, bien empleando los modelos de pudrición (dosis-respuesta y pérdida de masa) o índices climáticos como el índice Scheffer.

Además, la caracterización a nivel relativo por cualquiera de los dos métodos, que supone el cálculo de índices territoriales, requiere el cálculo previo del valor absoluto de cada territorio. Esta caracterización a nivel relativo aporta como principal ventaja la facilidad para comparar diferentes lugares del territorio.

La obtención de índices relativos tiene como ventaja adicional el permitir establecer isolíneas de riesgo relativo en amplias zonas territoriales respecto de una estación de referencia (que la comunidad científica ha asumido por consenso que sea la de Uppsala en Suecia).

Dado que los modelos de pudrición no se encuentran todavía plenamente validados y necesitan para su construcción y/o validación de datos reales de clima del material en numerosos lugares del territorio, en España se llevó a cabo un primer proceso de caracterización territorial empleando el índice Scheffer. Como se indicó en el capítulo 3, los valores de los índices relativos obtenidos empleando este índice, no difieren significativamente de los obtenidos empleando los modelos de dosis-respuesta. Por ello el empleo del índice Scheffer se considera una aproximación válida y mucho más sencilla, pues hace uso de datos climáticos accesibles en AEMET (Agencia Estatal de Meteorología, 2010) o en organismos meteorológicos locales.

El equipo de investigación sobre Física de la madera del INIA, liderado por el Dr. Fernández-Golfín, del que forma parte la candidata, sigue trabajando en el proyecto del Plan estatal BIA2013-42434-R (2014-2017), denominado *Evaluación del comportamiento funcional de la madera maciza en condiciones de uso exterior sin contacto con el suelo*, en colaboración con la Universidad de Córdoba, la Universidad de Valladolid (Campus Palencia), la Universidad de Huelva, así como de investigadores de NEIKER (Vitoria) y de particulares (Llames de Pría, Asturias). Este proyecto sigue todavía activo, ya que tiene en proceso de monitorización seis dispositivos experimentales instalados en distintas localidades peninsulares, de los que sigue extrayendo datos sobre clima del material y

estado de conservación de las maderas expuestas. Este trabajo seguirá estando operativo hasta que se empiece a detectar el comienzo de la pudrición en las maderas expuestas.

#### 4.2.2. Contribución al estado del arte

Los trabajos de investigación efectuados hasta el momento, recogidos en el punto 4.2.4., han sido citados por los principales investigadores en la materia, ya que existía una notable laguna de conocimiento sobre el riesgo relativo que para la pudrición de la madera implicaba la presencia de un nivel térmico favorable para el desarrollo de los hongos durante todo el año y el efecto que otras variables meteorológicas (como la insolación) tienen en el proceso de pudrición de la madera.

Además de la obtención de un mapa de riesgo basado en el índice Scheffer, los trabajos efectuados hasta el momento han permitido observar que en las zonas no sometidas a estables y elevados valores de humedad relativa (fundamentalmente zonas costeras), la insolación (número de horas de insolación por mes) jugaba un papel crítico, de forma que el riesgo era menor en aquellas localidades donde esta insolación se repartía de forma homogénea durante todo el año. Análogamente y para las zonas costeras, los trabajos efectuados han permitido demostrar que las localidades de mayor riesgo son aquellas que tienen veranos cortos y con mayor frecuencia de precipitación.

También se concluyó, por primera vez en la bibliografía científica, que la presencia frecuente de condensación es un factor agravante del riesgo de pudrición y que, por lo tanto, esta variable meteorológica debe ser considerada en el momento de calcular este riesgo. Para ello los autores propusieron una expresión de cálculo del índice Scheffer que integraba en su seno el número de días con condensación. En base al empleo de este nuevo índice, los autores propusieron una nueva calificación de riesgo de pudrición, de acuerdo con el criterio mostrado en la Tabla 8.

Tabla 8. Clasificación del riesgo de pudrición en función del valor del índice Scheffer modificado.

Valor del índice	Clasificación del riesgo
0-35	Bajo riesgo de pudrición
36-70	Riesgo medio de pudrición
71-100	Alto riesgo de pudrición
>100	Riesgo extremo de pudrición

Derivado de estos trabajos, el grupo de investigación propuso una herramienta informática para la asignación del riesgo (expresado en forma de clases de uso de la norma EN 335) en función de la localidad o ubicación del elemento de madera y de ciertas características del diseño.

Los trabajos siguen en marcha y tan pronto como empiecen a aparecer pudriciones en los elementos de la madera de referencia (*Picea abies*) expuestos en las diferentes localidades, se procederá a validar y, en su caso, modificar los modelos de degradación que figuran en el capítulo 3 de este trabajo. No es esperable que estos resultados estén disponibles antes de 5 años.

#### 4.2.3. Resumen de los trabajos

##### 4.2.3.1. Metodología

Lo primero que se hizo fue llevar a cabo una clasificación territorial del riesgo de pudrición, empleando para ello el valor de los índices Scheffer (SCI) y Scheffer modificado (SCI2)

considerando los datos climáticos aportados por AEMET para el periodo 1971-2000. Las expresiones usadas para el cálculo fueron las siguientes:

$$SCI = \sum_{ene}^{dic} \frac{(T-2) \cdot (D-3)}{16.7} \text{ expresión [16] del cap. 3}$$

$$SCI2 = \sum_{ene}^{dic} \frac{(T-2) \cdot ((D+N \cdot C)-3)}{16.7} \text{ expresión [21] del cap. 3}$$

Donde D es el número medio de días al mes con lluvia superior o igual a 0,2 mm, T es la temperatura media mensual en °C, C es el número de días en los que hace acto de presencia las condensaciones y/o las escarchas y N es un coeficiente que fue establecido empíricamente, y de forma provisional, en 0,6.

Adicionalmente se calculó el riesgo de degradación física y dimensional de la madera, denominado RDA, como la diferencia entre el contenido de humedad promedio mensual máximo (MCMAX) y mínimo (MCMIN) de la madera en cada localidad. Para calcular el contenido medio mensual de la humedad de equilibrio a partir de los datos de temperatura media mensual y humedad relativa de cada localidad, se utilizó el modelo de Zuritis, adaptado para madera por Avramidis (1989).

Otras variables que fueron calculadas en este trabajo fueron las severidades climáticas de verano y de invierno, de acuerdo con las siguientes expresiones (Ministerio de Fomento, 2017):

$$WCSI = a \cdot DD + b \cdot \frac{n}{N} + c \cdot DD^2 + d \cdot \left(\frac{n}{N}\right)^2 + e \text{ Índice de severidad climática de invierno}$$

$$SCSI = f \cdot DD + g \cdot DD^2 + h \text{ Índice de severidad climática de verano}$$

Donde:

DD son los grado-día para temperatura base de 20°C, evaluados para el periodo considerado (verano o invierno) y n/N es la relación entre el número total de horas con sol y el total de horas máximas con sol, evaluado por separado para los meses de verano (junio a septiembre) (n/N) S, e invierno (octubre a mayo), (n/N) W. Los factores a-h son coeficientes tabulados (Ministerio de Fomento, 2017).

Conocidos los valores del SCI a nivel nacional, se seleccionaron siete localidades nacionales para ubicar en ellas los dispositivos experimentales del proyecto. Los lugares seleccionados junto con la fecha de instalación y otros datos de los dispositivos experimentales quedan reflejados en la Tabla 9.

Tabla 9. Ubicación y datos de los dispositivos experimentales.

Localidad	SCI	SCI2	Clima	Efectos colaterales	Fecha de instalación
Asturias-Llames (Lugar Privado)	81	126	Costero noratlántico	Efecto mar	19/03/2015
Vitoria (NEIKER)	45	76	Continental	Proximidad a grandes fuentes de humedad (lago)	12/03/2015
Palencia (Universidad-ETSIAM)	23	74	Continental	Fríos inviernos, veranos calurosos	28/01/2015
Madrid (INIA)	22	42	Continental	Verano largo e intenso	27/11/2014
Córdoba (Universidad Córdoba)	16	35	Continental	Verano extremo	07/04/2015
Huelva (Universidad Huelva)	26	62	Costero suratlántico	Efecto mar	08/04/2015
Valencia (Lugar privado)	26	62	Costero mediterráneo	Efecto mar	4/03/2015 (eliminado 16/09/2015)

Cada dispositivo experimental constaba de una mesa metálica (Figura 14) sobre la que se disponían horizontalmente siete tablas de madera aserrada de 20x100x750 mm<sup>3</sup>, separadas entre sí 20 mm. Las tablas presentes en cada dispositivo eran de las siguientes maderas: pino silvestre (PS), pino laricio (PL), pino radiata (PR), castaño europeo (CS), eucalipto blanco (EU), pino radiata termotratado (a 210°C) y abeto rojo (SP), siendo esta última la madera de referencia. Todas las piezas incluidas en cada dispositivo fueron seleccionadas de madera aserrada tangencialmente, colocada con la médula hacia arriba para evitar el efecto colateral producido por un excesivo agrietamiento.

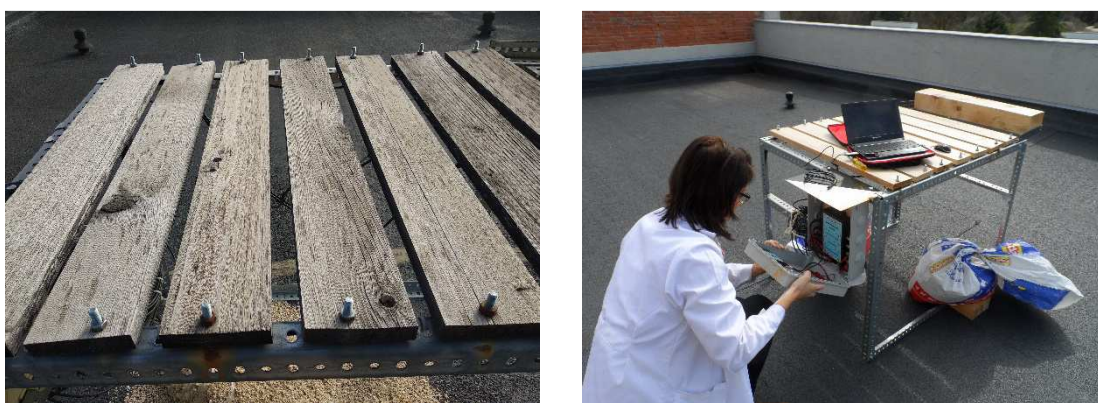


Figura 14. Detalle de dispositivo experimental (Madrid).

Estas maderas fueron elegidas por su presencia común en productos de construcción tanto en el mercado español como europeo, así como por sus características particulares en cuanto a su capacidad de adsorción y secado y su susceptibilidad al agrietamiento. Los dispositivos experimentales fueron colocados al aire libre sin ninguna protección contra el sol o la lluvia y en dirección norte-sur (tablas dispuestas en dirección este-oeste).

En cada dispositivo, el contenido de humedad de cada una de las piezas de madera maciza fue registrado cada dos horas utilizando un dispositivo de medida y posterior almacenamiento de datos, instalado dentro de una caja protectora para evitar fugas (Figura 14). Las mediciones del contenido de humedad se han efectuado ininterrumpidamente desde el momento de instalación de cada dispositivo. Como sensores se utilizaron tornillos de acero inoxidable insertados desde la cara inferior hasta el centro de las piezas (10 mm), estando los 7 mm más exteriores cubiertos de teflón para evitar

medir la humedad de la superficie. Para determinar la temperatura de la madera se insertó un sensor de temperatura tipo RTD en una de las piezas de pino silvestre del dispositivo y la temperatura fue registrada al mismo tiempo y con el mismo intervalo que el contenido de humedad.

El estado de conservación (pudrición) fue evaluado cada tres meses de acuerdo con el protocolo de la norma EN 252, anotándose la fecha en la que hacía acto de presencia el estado de pudrición 1 (ligero). En el mismo momento también se evaluaba el nivel de fendas presentes en las muestras, de acuerdo con el criterio de la norma ISO 4628-4.

Este diseño y metodología de medida fueron adoptados para cumplir con las recomendaciones europeas vistas en el capítulo 3. Se buscó la máxima coincidencia metodológica con otros estudios de caracterización a nivel europeo en el marco de la Cost Action FP1303 y así poder contribuir a la creación de una base de datos europea que permitiera validar y optimizar los modelos de degradación.

El dispositivo utilizado para medir y registrar el contenido de humedad de la madera estaba compuesto por un xilohigrómetro de ocho canales (Gigamodule de Scanntronik GmbH) y un registrador de datos (Thermofox de Scanntronik GmbH), equipos que se han empleado comúnmente en otros estudios similares realizados a nivel europeo.

El dispositivo ubicado en Valencia fue retirado en septiembre de 2016 debido a un problema con el permiso de instalación. Como las ubicaciones de Valencia y Huelva tienen los mismos valores de índice de Scheffer (SCI y SCI2), así como el efecto del mar (Tabla 9), el dispositivo de Valencia no fue reemplazado por otro y la ubicación fue eliminada del estudio.

Para obtener datos de alta calidad y evitar errores de medición, se monitoreó continuamente el funcionamiento del dispositivo de medición (Gigamodule) conectando una resistencia calibrada de 10 M $\Omega$  al canal 8 del equipo.

Para la conversión de las medidas de resistencia eléctrica en lecturas de contenido de humedad se utilizaron las curvas de calibración vistas en el apartado 4.1.3.2.

Este trabajo de monitorización de los dispositivos experimentales continúa en la actualidad, siendo la candidata la responsable de analizar los resultados obtenidos.

#### **4.2.3.2. Resumen de resultados**

Como resultado del primer trabajo de caracterización del riesgo de pudrición, en la Tabla 10 se muestran, para las 56 capitales de provincia españolas, los valores de la severidad climática en invierno (WCS) y verano (SCS), la temperatura media (T), el valor medio de los grados-día de verano (SDD) e invierno (WDD), los valores de insolación relativa para verano (n/N)<sub>S</sub> y para invierno (n/N)<sub>W</sub>, así como los valores medio (MCMED), máximo (MCMAX) y mínimo (MCMIN) del contenido de humedad, junto con el valor del Riesgo de Deformación y Agrietamiento (RDA), calculado éste como la diferencia entre el contenido de humedad máximo y mínimo de la madera en cada localidad. También en dicha tabla se muestran los valores del índice de Scheffer calculados de la forma tradicional (SCI) y teniendo en cuenta el efecto del rocío (SCI2). En esta tabla también se incluye la relación entre los dos valores del índice Scheffer. Todos estos valores fueron calculados empleando los datos climáticos publicados por AEMET para las 56 capitales de provincia españolas (1971-2000).

Tabla 10. Datos históricos para las capitales de provincia (periodo 1971-2000).

Capital	WCS	SCS	SDD	WDD	(n/N)S	(n/N)W	T	MC <sub>MED</sub>	MC <sub>MAX</sub>	MC <sub>MIN</sub>	RDA	SCI	SCI2	SCI2/SCI	SCI2-SCI
Albacete	1,12	1,07	423,3	2634,3	0,72	0,62	13,7	12,1	16,4	8,4	8	21	34	1,6	12
Alicante	0,24	1,38	529,6	1374,3	0,71	0,64	17,8	12,4	13,0	11,7	1,3	16	29	1,8	12
Almería	0,13	1,50	570,4	1181,3	0,72	0,65	18,7	12,5	13,5	11,5	2,0	7,0	17	2,4	10
Ávila	1,67	0,30	158,0	3260,3	0,72	0,59	10,3	12,0	16,1	8,1	8,0	21	48	2,3	27
Badajoz	0,59	1,49	567,3	1862,8	0,68	0,55	16,6	12,5	17,3	9,1	8,2	27	56	2,0	29
Barcelona	0,62	0,70	295,8	1917,0	0,64	0,58	15,5	13,9	14,6	12,9	1,7	17	18	1,1	1
<u>Bilbao</u>	0,81	0,30	157,7	2059,4	0,49	0,38	14,3	14,0	14,5	13,5	1,0	88	131	1,5	<u>42</u>
Burgos	1,76	0,24	136,9	3302,6	0,70	0,49	10,2	14,1	18,2	11,1	7,1	32	70	2,2	38
Cáceres	0,67	1,55	588,6	1967,1	0,67	0,53	16,1	10,9	15,7	6,9	8,8	30	65	2,2	35
Cádiz	0,09	1,09	430,6	1115,9	0,73	0,65	18,6	13,7	15,0	12,6	2,4	28	39	1,4	11
<u>Castellón</u>	0,41	1,08	425,8	1623,0	0,67	0,6	17,0	12,7	13,5	11,9	1,6	18	70	3,8	<u>52</u>
Ciudad Real	1,01	1,31	505,4	2469,2	0,74	0,59	14,7	11,9	17,0	8,2	8,8	26	51	2,0	25
Córdoba	0,44	1,85	696,2	1671,9	0,73	0,61	17,7	11,7	16,3	8,0	8,3	16	35	2,2	19
A Coruña	0,68	0,00	53,9	1894,2	0,54	0,42	15,5	15,2	15,7	14,2	1,5	87	113	1,3	26
Cuenca	1,36	0,77	318,2	2881,7	0,70	0,56	12,5	11,9	15,8	8,3	7,5	28	62	2,2	33
Girona	0,91	0,72	303,1	2309,9	0,60	0,55	14,3	13,9	15,7	11,4	4,3	34	35	1,0	1
Granada	0,83	1,32	509,4	2258,2	0,75	0,63	15,1	11,0	15,1	7,5	7,6	19	48	2,5	29
Guadalajara	1,10	0,95	379,8	2540,9	0,69	0,51	10,5	11,6	15,0	8,8	6,2	25	57	2,3	32
Huelva	0,18	1,44	550,3	1237,9	0,74	0,61	18,1	12,1	15,0	9,4	5,6	26	62	2,4	36
Huesca	1,11	0,83	339,1	2590,9	0,69	0,58	13,6	11,9	16,7	8,8	7,9	27	38	1,4	11
Jaén	0,54	1,80	678,7	1837,4	0,74	0,62	17,1	11,0	14,1	7,3	6,8	25	30	1,2	5
<u>León</u>	1,55	0,38	187,2	3120,8	0,70	0,58	10,9	13,2	17,4	10,2	7,2	27	72	2,7	<u>45</u>
Logroño	1,04	0,69	292,5	2474,2	0,65	0,53	13,5	12,8	16,0	10,4	5,6	40	54	1,4	14
<u>Lleida</u>	0,91	1,13	441,5	2338,9	0,71	0,59	14,7	12,4	17,4	9,3	8,1	22	64	2,9	<u>42</u>
<u>Lugo</u>	1,33	0,06	78,2	2766,8	0,52	0,41	11,5	15,7	18,1	14,0	4,1	57	109	1,9	<u>52</u>
Madrid	0,96	1,00	396,2	2374,2	0,72	0,55	14,6	10,7	14,6	7,3	7,3	22	42	1,9	21
Málaga	0,20	1,28	496,5	1297,6	0,72	0,63	18,0	12,4	14,2	10,8	3,4	18	46	2,5	28
Murcia	0,37	1,08	427,0	1544,3	0,65	0,59	18,6	10,8	13,1	8,9	4,2	15	40	2,6	25
<u>Ourense</u>	0,89	0,77	319,8	2186,8	0,57	0,41	14,5	12,5	15,4	10,8	4,6	54	105	2,0	<u>51</u>
<u>Oviedo</u>	1,01	0,03	68,2	2375,0	0,46	0,43	12,9	15,6	16,3	14,8	1,5	81	126	1,6	<u>45</u>
<u>Palencia</u>	1,36	0,41	197,2	2892,4	0,74	0,56	11,7	12,6	16,9	9,1	7,8	23	74	3,3	<u>52</u>
Palma de Mallorca	0,25	1,26	486,4	1358,3	0,69	0,60	18,0	13,3	14,0	12,3	1,7	27	41	1,5	14
<u>Pamplona</u>	1,26	0,45	210,4	2734,8	0,67	0,50	12,5	13,0	16,0	10,9	5,1	49	94	1,9	<u>45</u>
Pontevedra	0,60	0,37	181,6	1817,7	0,65	0,48	14,8	13,2	14,5	12,1	2,4	80	87	1,1	7
Salamanca	1,41	0,58	254,3	2955,7	0,73	0,59	11,7	13,1	18,1	9,4	8,7	23	33	1,5	10
San Sebastián	0,95	0,00	53,5	2286,3	0,52	0,43	13,2	15,5	17,0	14,6	2,4	95	123	1,3	28
Santander	0,68	0,04	72,2	1939,7	0,55	0,47	14,1	14,8	15,4	14,2	1,2	89	122	1,4	33
Segovia	1,44	0,55	242,6	2952,5	0,71	0,50	11,9	11,9	15,5	8,5	7,0	25	39	1,6	14
Sevilla	0,28	1,87	702,4	1447,8	0,74	0,66	18,6	11,3	14,8	8,5	6,3	25	38	1,5	13
Soria	1,68	0,42	199,7	3236,3	0,70	0,52	10,6	13,0	16,4	10,0	6,4	31	68	2,2	37
Tarragona	0,40	1,35	518,6	1585,7	0,66	0,59	17,3	11,8	13,1	10,5	2,6	24	44	1,8	20
Teruel	1,45	0,62	266,3	3014,4	0,69	0,59	11,8	12,4	16,1	9,6	6,5	15	52	3,5	37

Capital	WCS	SCS	SDD	WDD	(n/N)S	(n/N)W	T	MC <sub>MED</sub>	MC <sub>MAX</sub>	MC <sub>MIN</sub>	RDA	SCI	SCI2	SCI2/SCI	SCI2-SCI
Toledo	0,81	1,59	604,4	2209,0	0,73	0,61	15,3	11,7	16,7	8,0	8,7	23	40	1,7	16
Valencia	0,41	1,06	417,9	1609,1	0,68	0,60	17,8	12,1	12,5	11,3	1,2	26	62	2,4	36
Valladolid	1,34	0,72	301,7	2842,1	0,72	0,53	12,3	12,3	17,7	8,7	9,0	27	61	2,3	34
Vitoria	1,41	0,17	114,5	2893,2	0,58	0,47	11,4	14,9	17,7	13,5	4,2	45	76	1,7	32
Zamora	1,24	0,66	280,1	2753,3	0,73	0,57	12,8	12,6	17,4	9,0	8,4	26	46	1,8	20
Zaragoza	0,90	1,07	420,7	2293,3	0,66	0,55	15,0	11,8	15,4	8,9	6,5	25	33	1,3	8
<b>Valor Max.</b>	<b>1,76</b>	<b>1,87</b>	<b>702,4</b>	<b>3302,6</b>	<b>0,8</b>	<b>0,7</b>	<b>18,7</b>	<b>15,7</b>	<b>18,2</b>	<b>14,8</b>	<b>9</b>	<b>95</b>	<b>131</b>	<b>3,8</b>	<b>52</b>
<b>Valor Min.</b>	<b>0,09</b>	<b>0,00</b>	<b>53,5</b>	<b>1115,9</b>	<b>0,5</b>	<b>0,4</b>	<b>10,2</b>	<b>10,7</b>	<b>12,5</b>	<b>6,9</b>	<b>1</b>	<b>15</b>	<b>33</b>	<b>1,0</b>	<b>7</b>

Cuando se comparan los valores de SCI y SCI2 en la Tabla 10, se puede observar que la condensación tiene un efecto significativo en el valor del SCI, aumentando el riesgo, en promedio, 2.0 veces, aunque el incremento puede variar entre 3.8 (Castellón) y 1.0 (Girona). No se detectó un patrón claro que permitiera explicar la presencia de valores relativos (SCI2/SCI) más altos o más bajos en una localidad concreta, salvo que los valores relativos más altos normalmente están más relacionados con la presencia cercana de grandes masas de agua (ríos, embalses y zonas costeras) y/o de temperaturas mínimas más acusadas.

En general se observa que las situaciones más extremas se producen en aquellas localidades en las que el valor SCI2 > 100 y que la diferencia SCI2 - SCI > 40. En la Tabla 10 se subrayan aquellas capitales de provincia que presentan valores de SCI2-SCI > 40.

También se relacionó el valor del índice RDA, que expresa el riesgo de que la madera se agriete o ateje intensamente y que con ello sea capaz de acumular más agua de lluvia o condensación (lo que genera mayores riesgos de pudrición), con los valores de las severidades de invierno y verano de cada localidad. La expresión obtenida fue la siguiente:

$$RDA = -4,24042 + 4,73726*SCS + 6,24191*WCS \quad (R^2 = 83\%)$$

Esta relación indica un comportamiento lógico de la madera, ya que conforme mayores sean las variaciones del contenido de humedad a lo largo del año, mayores serán también los movimientos dimensionales, causantes tanto del agrietamiento como del atejado de la madera.

Análogamente se analizó la relación existente entre el valor del SCI y las severidades climáticas de verano e invierno, si bien dicho análisis se efectuó de forma separada para las localidades de interior y para las costeras, ya que los constantes y elevados valores de la humedad relativa de estas últimas hacían prever un comportamiento distinto. El modelo obtenido para las zonas costeras fue el siguiente:

$$SCI = 87,5517 - 53,4837*SCS \quad (R^2 = 85,1\%)$$

En este modelo, el efecto de la severidad climática de invierno (WCS) no fue estadísticamente significativo, probablemente debido a que en las zonas costeras españolas las temperaturas invernales son más suaves (temperaturas medias siempre superiores a 2°C, por tanto por encima del nivel de inhibición de la actividad fúngica) y el



nivel de humedad en la madera es relativamente alto y constante durante todo el invierno (debido al efecto de una humedad relativa alta y constante) por lo que la actividad fúngica, estimada por el índice de Scheffer (SCI), permanece estable durante todo el invierno. Por el contrario, se observa un efecto estadísticamente significativo de la severidad climática de verano (95%), que puede deberse a la reducción de la actividad fúngica cuando se alcanza el menor contenido de humedad debido a la acción de secado de la madera producida por temperaturas más altas. Aumentar los valores de SCS implica aumentar las temperaturas; pero, aunque esto podría conducir a una actividad fúngica más intensa, esta actividad en realidad disminuye como consecuencia de un secado más intenso, favorecido por la ausencia de lluvias y las altas temperaturas.

Para analizar más en profundidad el riesgo en las zonas costeras se relacionó el valor del SCI con el número de días-grado en verano (DDS), obteniendo la siguiente ecuación:

$$\text{SCI} = 96,1542 - 0,158101 * \text{DDS} \quad (R^2 = 84,8\%)$$

Este resultado pone de manifiesto que lo que realmente hace disminuir el riesgo de pudrición en las zonas costeras es el número de días-grado en verano, es decir, la temperatura media del verano. Lugares costeros con veranos largos y cálidos conllevan menores riesgos que lugares con veranos más cortos y/o con temperaturas más bajas, y todo ello porque estas temperaturas afectan al secado de la madera, que será más intenso y prolongado en las primeras localidades.

Para las zonas de interior también fue ajustado un modelo que relacionaba el valor del SCI con las severidades de invierno y de verano, el cual adoptó la siguiente forma:

$$\text{SCI} = 111,396 - 42,2681 * \text{SCS} - 38,497 * \text{WSC} \quad (R^2 = 65,2\%)$$

En este caso sí se aprecia que ambas severidades tienen una influencia significativa en el riesgo, debido al efecto que estas tienen en el clima del material. Para analizar más en profundidad las causas de la variabilidad del SCI en las zonas de interior, se relacionó el valor del SCI con el nivel de insolación relativa para verano (n/N)S y para invierno (n/N)W, obteniendo el siguiente modelo:

$$\text{SCI} = 128,616 - 69,3775 * (n/N)S - 94,758 * (n/N)W \quad (R^2 = 68,8\%)$$

Del análisis conjunto de los dos modelos obtenidos para la zona de interior se observa que es el grado de insolación, tanto de verano como de invierno, el factor que más influye en el riesgo de pudrición de la madera, probablemente debido a que la temperatura no es un factor limitante para el desarrollo de los hongos (porque habitualmente se sitúa por encima del nivel de 2°C de inhibición de actividad de los hongos) y la insolación lleva a un secado más intenso de la madera. Esta explicación se ve reforzada a través del modelo, también obtenido en este trabajo, que relaciona la humedad de equilibrio de la madera en cada localidad de interior con su nivel de insolación. El modelo es el siguiente:

$$EMC = 19,5822 - 0,0323495 * I \quad (R^2 = 83,7\%)$$

Siendo I el número medio mensual de horas de insolación.

Este modelo no puede ser ajustado para las localidades costeras, ya que en estas zonas el EMC permanece estable y elevado todo el año por efecto de la elevada y constante humedad relativa.

En general se observa que los modelos obtenidos para las zonas de interior explican en menor grado la variabilidad observada que los calculados para las zonas costeras, debido a la mayor variabilidad climática que se produce en las zonas de interior.

Con los resultados de este primer trabajo se elaboraron mapas de riesgo. En las Figuras 15 y 16 se refleja la clasificación territorial obtenida empleando los valores del índice Scheffer de cada localidad (malla de 5 km) que figuran en la tabla 4.4 (valor SCI). Las distintas zonas de riesgo aparecen coloreadas siguiendo el criterio original de Scheffer. Adicionalmente, en la Figura 15 se señalan las ubicaciones de los siete dispositivos experimentales.

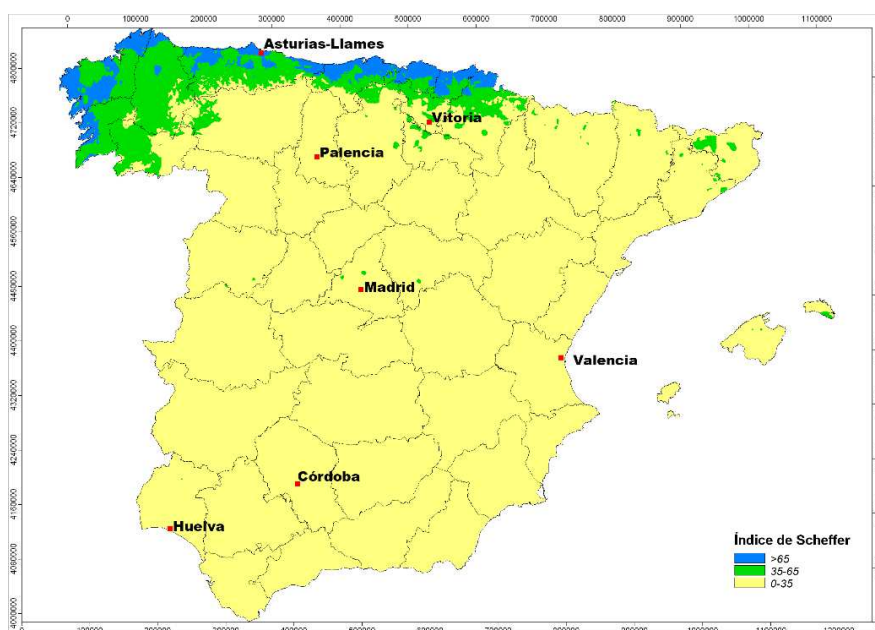


Figura 15. Clasificación territorial del riesgo de pudrición en función del valor del índice Scheffer tradicional (Fernández-Golfín *et al.*, 2016) y ubicación de los dispositivos experimentales (Conde *et al.*, 2021).

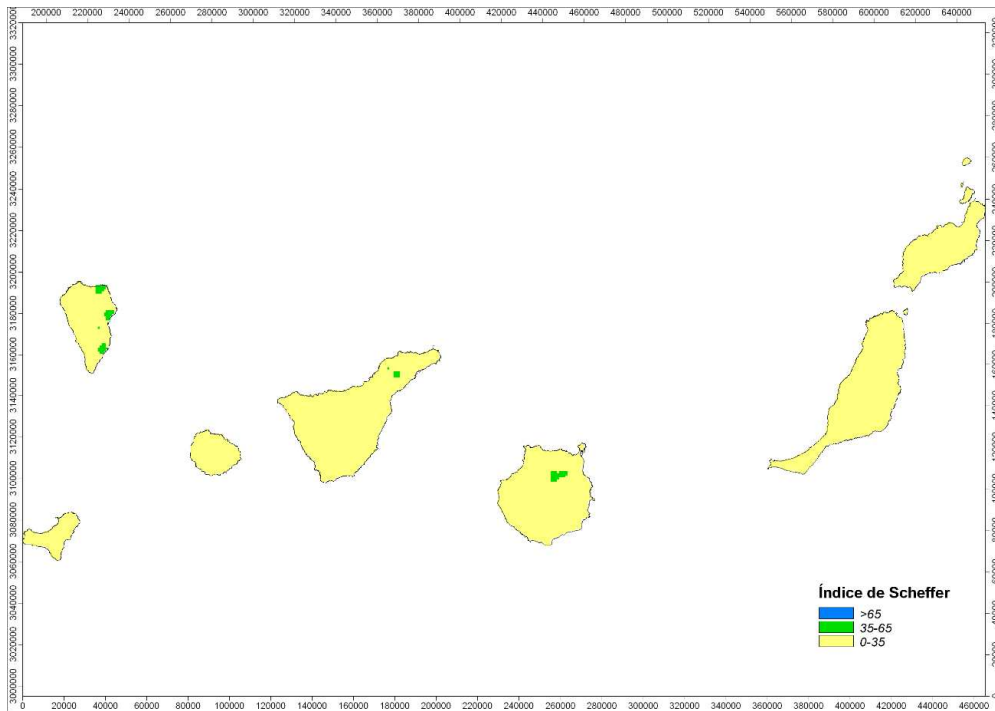


Figura 16. Clasificación territorial del riesgo de pudrición en las Islas Canarias en función del valor del índice Scheffer tradicional (Fernández-Golfín *et al.*, 2016).

Los trabajos de monitorización del clima del material y de su estado de conservación continúan en la actualidad, recogiendo datos generados en las diversas estaciones. En el apartado 4.2.3.4 se aportan algunas de las conclusiones extraídas.

Como ejemplo, se muestra en la Figura 17 la evolución del contenido de humedad de la madera de referencia (*Picea abies*) en la estación de Vitoria en el periodo 2015-2018.

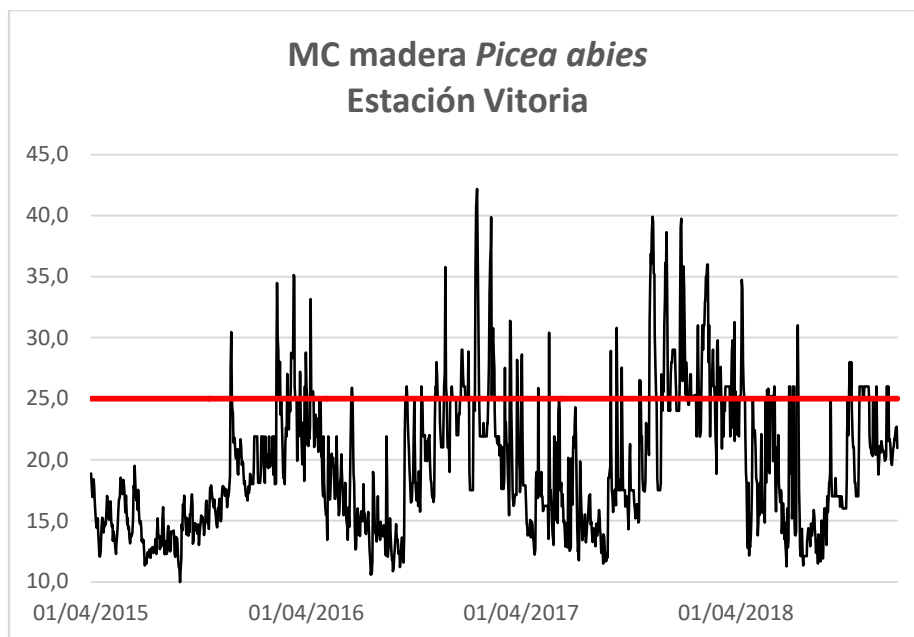


Figura 17. Evolución del MC de la madera de *Picea abies* en la estación de Vitoria (señalado el umbral del 25%).

#### 4.2.3.3. Principales conclusiones

En este apartado se extraen las siguientes conclusiones:

- 1) La modificación propuesta para la incorporación del efecto condensación en el índice Scheffer ha demostrado su utilidad a la hora de explicar las diferencias observadas en el comportamiento de la madera al exterior entre localidades cuyo índice Scheffer tradicional es similar.
- 2) Se demuestra que la condensación tiene un efecto significativo en el valor del SCI aumentando el riesgo en promedio 2 veces, aunque el incremento puede variar entre 3,8 (Castellón) y 1,04 (Girona).
- 3) Si se emplea el índice Scheffer modificado (SCI2) para clasificar el riesgo de pudrición de la madera en el territorio, deberá emplearse el siguiente criterio (Tabla 11):

Tabla 11. Criterio de clasificación del riesgo de pudrición en función del valor del índice Scheffer modificado (SCI2).

Valor calculado del índice Scheffer modificado (SCI2)	Calificación de la estación	Clasificación del riesgo
$IS \leq 35$	Seca	Bajo riesgo de pudrición
$35 < IS \leq 70$	Húmeda	Riesgo medio de pudrición
$70 < IS \leq 100$	Muy húmeda	Alto riesgo de pudrición
$IS > 100^*$	Extremadamente húmeda	Riesgo extremo de pudrición
(*) Los autores sugieren asimilar las estaciones con $SCI2 > 100$ a clase de uso 4 de la norma EN 335		

- 4) Se demuestra que el riesgo de pudrición en las zonas costeras depende del número de días-grado en verano, es decir, de la temperatura media del verano. De acuerdo con esto, los lugares costeros con veranos largos y cálidos presentan un menor riesgo de pudrición que los lugares con veranos más cortos y/o con temperaturas más bajas, y todo ello porque estas temperaturas afectan al secado de la madera, que será más intenso y prolongado en las primeras localidades.
- 5) El riesgo de pudrición en las zonas de interior parece depender fundamentalmente del grado de insolación, tanto de verano como de invierno, dado que la temperatura media mensual no es un factor limitante para el desarrollo de los hongos y la insolación guarda una relación directa con la menor precipitación y el secado más intenso.
- 6) El efecto agravante del riesgo que supone la baja insolación lleva a concluir que en las zonas de umbría este riesgo se eleve respecto de las zonas de solana, aún en territorios dotados con los mismos registros meteorológicos. Este efecto es significativo tanto en verano como en invierno. Por ello, los mapas reflejados en las Figuras 15 y 16 han de ser manejados con cuidado ya que, aunque en una determinada zona geográfica el mapa indique un nivel de riesgo determinado, éste puede ser superior en una ubicación de umbría o cercana a una gran fuente de humedad (ríos, lagos, etc.).
- 7) Respecto al diferente riesgo observado en el territorio nacional derivado de los trabajos de monitorización, se extraen algunas conclusiones provisionales:
  - a. En lo que respecta al “tiempo de mojado” (tiempo durante el cual el contenido de humedad de la madera supera un determinado valor umbral) y a igualdad de especie, existe una notable diferencia de comportamiento entre las maderas ubicadas en las estaciones de Llames (Asturias) y Vitoria respecto de las ubicadas en el resto de las estaciones peninsulares. Esto es debido a sus diferentes regímenes pluviométricos y/o de condensaciones (Vitoria, sobre todo). En general, las estaciones ubicadas en localidades con clima continental (Palencia, Madrid, Córdoba) presentan comportamientos similares, existiendo ligeras diferencias entre

- ellas en función de su distinto régimen pluviométrico. Este comportamiento es compatible con los similares valores del SCI correspondientes a las zonas de interior.
- b. El “tiempo de mojado” europeo (TOW25) (MC>25%) es muy reducido en todas las estaciones analizadas. Siguiendo este criterio europeo de riesgo de pudrición (TOW25), en las estaciones analizadas difícilmente se pudriría la madera, extremo éste que no es cierto. Por ello es necesario afirmar que los modelos predictivos europeos fallan con nuestro clima y condiciones, debido quizá a la presencia de diferentes agentes degradadores (hongos) o a su diferente actividad o sinergias. En la actualidad se trabaja de forma más conservadora considerando un umbral del 18% para definir el tiempo de mojado (TOW18) y analizando además su relación con la pudrición observada (de momento nula).
  - c. Los datos demuestran que los mayores cambios que se producen en el comportamiento de la madera expuesta al exterior son debidos a la presencia de lluvia, no a la humedad relativa. La humedad ambiental por sí sola no pone en riesgo a la madera puesto que no permite un contenido de humedad superior al 18%. Por tanto, el factor principal que afecta a la degradación de la madera al exterior es la presencia de agua líquida procedente de la lluvia o de las condensaciones superficiales.

#### 4.2.4. Contribución del candidato

Durante la ejecución del proyecto BIA2013-42434-R, de *Evaluación del comportamiento funcional de la madera maciza en condiciones de uso exterior sin contacto con el suelo*, en cuyo seno se están generando los datos necesarios para la clasificación territorial del riesgo así como para la obtención/verificación de modelos e índices predictivos del riesgo, la doctoranda se responsabiliza del montaje, instalación y seguimiento de los dispositivos experimentales distribuidos por la geografía peninsular así como de la preparación de la base de datos de evolución del clima del material, por especies y localidades. Junto a los directores de la Tesis y restantes miembros del equipo investigador del proyecto, la candidata interviene en la conceptualización y revisión de los artículos [1] del apartado 4.2.5.1 y de las contribuciones a congresos del apartado 4.2.5.2.

#### 4.2.5. Artículos y contribuciones efectuadas

##### 4.2.5.1. Artículos científicos referenciados (en negrita la candidata, subrayados los directores)

1. Fernández-Golfín, J.I., Larrumbide, E., Ruano, A., Galván, J., **Conde, M.**, 2016. Wood decay hazard in Spain using the Scheffer index: proposal for an improvement. Eur. J. Wood Prod., 74 (4), 591-599. ISSN: 0018-3768. 2014 IF: 1,082 10/22-Q2 (JCR) Cat: Materials Science, paper&Wood. <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1036-z>

##### 4.2.5.1. Contribuciones en Congresos

1. Fernández-Golfín Seco, J.I., **Conde García, M.**, Díez Barra, M.R., Conde García, M., Acuña Rello, L., 2016. Primeras conclusiones del proyecto BIA2013-42434R sobre degradación de la madera al exterior fuera de contacto con el suelo: Efecto del clima y de la especie. Comunicación en I Jornadas LIGNOMAD 2016 sobre Construcción con Madera y otros Materiales Lignocelulósicos. Barcelona, 20 y 21 de junio de 2016.
2. Fernández-Golfín Seco, J.I., **Conde García, M.**, Díez Barra, M.R., Conde García, M., Acuña Rello, L., Torres Álvarez, E., Perea Alonso, E., Troya, M.T., 2017. Decay of wood in outdoor above ground applications: Preview of results on the effect of climate and species in Spain. Comunicación en 48th International Research Group on Wood Protection Annual Meeting. Ghent, Bélgica, 4 a 8 de junio de 2017.
3. Fernández-Golfín Seco, J.I., **Conde García, M.**, Díez Barra, M.R., Conde García, M., Acuña Rello, L., Torres Álvarez, E., Perea Alonso, E., 2017. Degradación de la madera

al exterior fuera de contacto con el suelo: Efecto del clima y de la especie. Comunicación oral en el 7º Congreso Forestal Español. Plasencia, Cáceres, 26-30 de junio de 2017.

4. Galván, J., Acuña, L., **Conde M.**, Conde M., Fernández-Golfín, J.I., 2017. Behavior of the wood outside the contact with the ground in Spain. Project BIA 2013-42434R. Comunicación en COST ACTION F9 1303 Workshop “Best practice and performance specification”. Universidad de Zagreb, Croacia, 6-7 de septiembre de 2017.



### 4.3. Caracterización del efecto de la especie en la resistencia biológica de la madera

#### 4.3.1. Introducción

De acuerdo con lo visto en el capítulo 3 de análisis del estado del arte, el modelo propuesto para la comprobación de diseños y materiales respecto de su durabilidad está basado en el empleo de la inecuación siguiente:

$$\text{Exposición} \leq \text{Resistencia} \quad [1]$$

En esta inecuación, el miembro izquierdo es independiente del material, ya que en él se calcula la carga de degradación propia del macro, meso y microclima correspondiente al lugar y uso previstos; y en el miembro derecho se tiene en cuenta todos los aspectos referidos a la durabilidad del material, incluida la especie.

Respecto al valor característico de la Resistencia ( $D_{RD}$ ) en la expresión [1], desde Isaksson *et al.* (2015) y Meyer-Veltrup *et al.* (2017) se adopta el siguiente criterio:

$$D_{RD} = D_{crit} * k_{wa} * k_{inh} \quad [2]$$

Donde  $D_{RD}$  es la resistencia de diseño;  $D_{crit}$  es la dosis crítica que corresponde a un estado límite de servicio descrito como "inicio de la pudrición" (*onset of decay*), definido este como el relativo a un estado de pudrición tipo 1 o 2 según la norma EN 252, para el material de referencia (*Picea abies*);  $k_{wa}$  es un primer factor corrector que tiene en cuenta el efecto de la especie de madera en la durabilidad; y  $k_{inh}$  es un segundo factor que tiene en cuenta las propiedades protectoras y características propias del tratamiento empleado (por ejemplo, por productos químicos preventivos aplicados). El material considerado como de referencia es la madera de abeto rojo (*Picea abies*) sin tratar de dimensiones 22x95x500 mm<sup>3</sup>, dispuesta horizontalmente con su cara radial hacia arriba y carente de trampas artificiales para la lluvia.

Esta forma de calcular la resistencia del material se basa en la comprobación experimental de que la dosis crítica,  $D_{RD}$ , que lleva a la superación del estado límite de servicio es sensiblemente similar para todas las especies (Isaksson *et al.*, 2013, 2015) cuando es evaluada en laboratorio pero que a nivel de uso, las diferencias aparecen ocasionadas por ciertas propiedades de cada especie relacionadas con su comportamiento frente al agua, tales como su mayor o menor permeabilidad o su tendencia al agrietamiento y al atejado. Estas propiedades afectan al tiempo de mojado, o tiempo durante el cual el material permanece húmedo. Otra causa de diferencias entre materiales y especies en lo que a durabilidad se refiere, y que por lo tanto modifica el valor de la resistencia crítica, radica en los tratamientos incorporados en la madera, la naturaleza especial de ciertos productos o las protecciones de barrera aplicadas.

Tal y como se aprecia, el factor especie de madera juega un papel central en la modificación del valor de la resistencia crítica del material para calcular el valor de la resistencia de diseño.

#### 4.3.2. Contribución al estado del arte

Sobre el tema del efecto de la especie en la durabilidad de la madera al exterior, Isaksson *et al.* (2015) concluyeron que las diferencias que observaban en el comportamiento de las



especies podían ser explicadas sobre la base de la existencia de diferencias en los procesos de ganancia y pérdida de humedad por parte de la madera y de propiedades protectoras inherentes al material. Estos autores agruparon los efectos debidos a las diferentes propiedades agua-madera en lo que denominaron factor especie ( $k_{wa}$ ) y los debidos a las propiedades de durabilidad propias del material en el factor inherente ( $k_{inh}$ ).

El efecto de la especie sobre la vida útil esperada de la madera no tratada se debe principalmente, además de aspectos relacionados con la durabilidad natural de la madera, a determinadas características físicas, como su susceptibilidad al agrietamiento, grado de permeabilidad o velocidad de secado, ya que todos estos aspectos inciden en el tiempo de mojado (tiempo durante el cual la madera tiene un contenido de humedad por encima del umbral de riesgo establecido), en la superficie en contacto con el agua y la profundidad alcanzada por la humedad.

Con respecto al efecto de la diferente capacidad de humectación o secado, lo esperable es que las especies de madera menos permeables al agua se comporten mejor que las que son más permeables en usos donde la madera está expuesta a humedecimiento intermitente (Brischke et al., 2014). Por lo tanto, es esperable que la capacidad de humectación y secado juegue un papel crucial en la madera expuesta a las condiciones exteriores en aquellas localidades donde los eventos de lluvia son cortos y escasos y los períodos secos son largos e intensos.

Los primeros en proponer valores de  $k_{wa}$  y  $k_{inh}$  fueron Isaksson et al. (2015), quienes propusieron los valores reflejados en la Tabla 12. Con posterioridad, Humar et al. (2019) propusieron nuevos valores, reflejados en la Tabla 13. Estos valores se expresan de forma relativa respecto del comportamiento del material de referencia (*Picea abies*), al que le corresponde un valor de  $k_{wa}/k_{inh} = 1,0$ .

Tabla 12. Valores de  $k_{wa}$  y  $k_{inh}$  propuestos por Isaksson et al. (2015).

Especie de madera	$k_{wa}$	$k_{inh}$
Abeto rojo ( <i>Picea abies</i> ) (1)	1,0	1,0
Albura de Pino silvestre ( <i>Pinus sylvestris</i> )	0,8	1,0
Duramen de pino silvestre ( <i>Pinus sylvestris</i> )	1,5	1,5
Duramen de alerce europeo ( <i>Larix decidua</i> )	1,5	1,5
Duramen de alerce siberiano ( <i>Larix sibirica</i> )	1,5	1,5
Duramen de abeto Douglas ( <i>Pseudotsuga menziesii</i> )	1,5	1,5
Duramen de Roble europeo ( <i>Quercus robur</i> )	1,0	1,5
Duramen de Robinia ( <i>Robinia pseudacacia</i> )	1,5	2,5
Duramen de cedro rojo ( <i>Thuja plicata</i> )	1,5	5,0
Albura tratada con protector CU 3.2 NP5	1,0	5,0
Albura tratada con protector CU 4 NP5	1,0	8,0
Materiales revestidos (2)	2,0	-
Madera termotratada de pino silvestre y abeto rojo	1,0	2,5
Albura furfúrilada de pino radiata, Pino amarillo y Pino silvestre (WPG 50%)	1,0	5,0
Albura acetilada de pino radiata, pino Amarillo y pino silvestre (contenido en acetil >20%)	1,0	8,0
Compuestos madera-plástico (WPC)	1,0	5,0
(1) No existe diferencia significativa entre albura y duramen		
(2) Este factor sólo se podrá emplear si existe un programa de supervisión periódica del estado de conservación de los acabados superficiales, considerando como límite de servicio la aparición de fisuras		
WPG=Porcentaje de ganancia de peso		

Tabla 13. Valores de  $k_{wa}$  y  $k_{inh}$  propuestos por Humar et al. (2019).

Especie de madera	$k_{wa}$	$k_{inh}$
Abeto rojo ( <i>Picea abies</i> ) (1)	1,0	1,0
Albura de Pino silvestre ( <i>Pinus sylvestris</i> )	1,2	1,1
Duramen de pino silvestre ( <i>Pinus sylvestris</i> )	1,2	2,5
Duramen de alerce europeo ( <i>Larix decidua</i> )	1,9	1,6
Duramen de Roble europeo ( <i>Quercus robur</i> )	1,5	3,9
Duramen castaño ( <i>Castanea sativa</i> )	1,3	5,0
Duramen Haya Europea ( <i>Fagus sylvatica</i> )	1,0	0,9
Duramen fresno ( <i>Fraxinus excelsior</i> )	1,0	1,2
Madera abeto rojo termotratada	1,8	3,1
Madera abeto tratada con ceras	2,4	1,3
Madera de abeto termotrada y con ceras	2,5	3,4
Madera de pino silvestre termotratada	2,1	2,6
Madera de pino silvestre termotratada y con ceras	2,6	3,3
Madera de abeto tratada con superficie acrílica (2)	2,9	1,1
Madera abeto tratada con protector de cobre	1,5	5,0
Madera de abeto termotratada y con protector de cobre	1,2	5,0
Madera de abeto tratada con protector de cobre y ceras	2,9	5,0
Madera de alerce termotratada	3,2	2,7
Madera de fresno termotratada	1,9	2,9
Madera de haya termotratada	2,1	2,6
Madera de haya termotratada y con ceras	2,6	3,3
(1) No existe diferencia significativa entre albura y duramen		
(2) Este factor sólo se podrá emplear si existe un programa de supervisión periódica del estado de conservación de los acabados superficiales, considerando como límite de servicio la aparición de fisuras		

Sobre la utilidad práctica de estos factores, es necesario indicar que como todavía no existen métodos de ensayo universalmente aceptados para su obtención, los valores de  $k_{wa}$  y  $k_{inh}$  antes citados solo pueden ser considerados como provisionales.

Otro aspecto a tener en cuenta es que los valores de  $k_{inh}$  de las Tablas 12 y 13 corresponden a materiales homogéneos. De esta forma, cuando se cita que el valor corresponde a madera de duramen o de albura, significa que sólo es aplicable si la pieza está compuesta íntegramente por albura o por duramen. En el caso de madera tratada indica que está compuesta por albura íntegramente tratada/modificada químicamente de acuerdo con la especificación. Análogamente, en el caso de madera tratada mediante métodos de barrera (por ejemplo, un recubrimiento acrílico), estos tratamientos deben ser mantenidos adecuadamente, ya que, en caso contrario, la ventaja inicial que estos tratamientos consiguen en el comportamiento higroscópico de la madera se convierte en desventaja cuando empiezan a craquelarse, tal y como reportaron Humar et al. (2019).

En el caso de piezas compuestas simultáneamente por albura y duramen los valores de los factores  $k_{wa}$  y  $k_{inh}$  serán distintos y variables según la proporción de ambos tipos de madera. Puesto que hay todavía una falta de conocimiento sobre el valor de ambos factores en todas las situaciones que se pueden dar en el uso constructivo de la madera, Isaksson et al. (2015) hicieron hincapié sobre la necesidad de emplear el sentido común y la experiencia.

En este ámbito, la candidata, en su artículo Conde et al. (2021a), artículo 1 en el apartado 4.3.5.1, haciendo uso de una metodología propia basada en la realización de ensayos al exterior con el método de exposición de referencia (Thelandersson et al., 2011) y en el análisis del efecto de la humedad según el número de días en los que la madera permanecía con un contenido de humedad superior o igual a 18%, estudiaron el efecto relativo de la especie, proponiendo para el  $k_{wa}$  un valor de 1,0 para las coníferas, de 2,51 para el duramen de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) y de 1,84 para el de castaño (*Castanea sativa*).

Tanto en los trabajos de Isaksson et al. (2015) como en los de Humar et al. (2019) y Conde et al. (2021) el efecto de la especie implica no solo el diferente efecto de su anatomía en la

capacidad de absorción o secado sino también, el de su susceptibilidad a la formación de fendas. Sobre el efecto de las fendas no existe una opinión común, ya que si bien Meyer-Veltrup *et al.* (2016), trabajando sobre abeto rojo encontraron un efecto menor y no significativo en el contenido de humedad, Osawa *et al.* (2019), trabajando sobre secuoya (*Sequoia sempervirens*) y cedro japonés (*Cryptomeria japonica*), demostraron que fendas de más de 20 mm de profundidad incrementaban el riesgo de pudrición.

### 4.3.3. Resumen de los trabajos

#### 4.3.3.1. Metodología

El trabajo llevado a cabo por la candidata y descrito en Conde *et al.* (2021a), artículo 1 del apartado 4.3.5.1, se basó en el análisis de los datos obtenidos en los seis dispositivos experimentales descritos en 4.2.3.1 durante los años 2016, 2017 y 2018. Los datos del dispositivo experimental de Valencia no fueron tomados en consideración ya que, debido a la inexistencia de lluvia, el contenido de humedad de madera no presentaba variaciones significativas.

Para estimar el factor especie en la pudrición de la madera y cómo se ve afectado por las diferentes características climatológicas de los sitios de ensayo, en este estudio se utilizó un índice de clima de material (NMC18), que consiste en calcular el número de días con un contenido de humedad superior al 18%.

A diferencia de otros estudios (Rapp *et al.*, 2000; Morris y Winandy, 2002; Meyer-Veltrup y Brischke, 2015; Brischke *et al.*, 2017) en los que se emplearon valores umbral para el MC en el intervalo entre el 20 y el 25%, en el trabajo de Conde *et al.* (2021) se utilizó un límite crítico del 18% por las siguientes razones:

1. Un valor de MC del 18% para la madera maciza representa el umbral de cambio de la clase de servicio 2 a la clase 3 según la norma EN 1995-1-1 (Eurocódigo 5) (EN 1995-1-1:2016 Eurocode 5), también incluida en el Código Técnico de la Edificación español (Ministerio de Fomento, 2009). Este valor del 18% es el límite a partir del cual se deben tomar en consideración los requisitos de fabricación de los productos (incluidos en sus normas armonizadas) debido al alto contenido de humedad. El uso de este umbral permite extraer conclusiones no solo con respecto a la durabilidad biológica, sino también a la resistencia física de los elementos de madera, especialmente los productos de madera laminada y aglomerada.
2. En todas las localidades de España, salvo en determinados momentos puntuales, la temperatura media durante el año (temperaturas medias mensuales entre 3° y 30°C) es favorable para el desarrollo de hongos, ya que se sitúa muy por encima del umbral inferior de actividad establecido por Viitanen (1997a). Por esta razón, es necesario considerar un límite de contenido de humedad más conservador ya que se puede esperar una mayor intensidad del ataque de hongos.
3. Numerosos estudios han detectado la colonización e incluso el ataque por hongos a niveles de contenido de humedad por debajo del punto de saturación de la fibra, e incluso a valores por debajo del 18%. Johannsson *et al.* (2013) establecieron una humedad relativa del 80% a temperatura ambiente, correspondiente a una EMC del 18% en madera maciza, por encima de la cual existe un riesgo no despreciable de desarrollo de pudrición por hongos. Del mismo modo, Morris y Winandy (2002) propusieron un valor límite del 20%, por razones de seguridad, para su uso en la construcción de entramado ligero de América del Norte. Por las condiciones térmicas favorables en la península ibérica para el rápido desarrollo de la pudrición de hongos, se decidió adoptar una estrategia de gestión de riesgo conservadora, utilizando un umbral de MC del 18%.
4. La técnica de medición utilizada para estimar el contenido de humedad de la madera (resistencia eléctrica), cuando se usa en condiciones exteriores y en material con grietas por secado (común en lugares con alta variación estacional de MC) presenta una incertidumbre notable ya que el agua que se acumula en las grietas puede dar

lugar a medidas altas inusuales. En nuestros dispositivos experimentales la intensidad del agrietamiento fue alta en todas las localizaciones excepto en Asturias-Llames, por lo que ocurrieron fluctuaciones irreales que afectaron a la precisión de la medición del MC. Estos valores anormalmente altos duran breves períodos de tiempo (4-8 horas) pero son suficientes para aumentar artificialmente el número de días con valores de MC por encima del 22 o 25% y que afectan también a los valores máximos de MC. En todas las localidades estudiadas, un nivel de contenido de humedad superior al 18% ya indica la presencia de eventos de lluvia y por lo tanto la existencia de un riesgo no despreciable de contenido de humedad compatible con el ataque de hongos.

Los datos climáticos de todos los sitios de ensayo durante los años 2016, 2017 y 2018 fueron obtenidos en las estaciones meteorológicas más cercanas de la AEMET, anotándose los valores de precipitación diaria, humedad relativa (HR) diaria y temperatura media diaria.

De acuerdo con lo visto en 4.2.3.1, la presencia de pudriciones, evaluadas de acuerdo con el protocolo de la norma EN 252, y el nivel de fendado medido de acuerdo con el criterio de la norma ISO 4628-4, fueron anotados trimestralmente.

En la Tabla 14 se recoge el sistema de valoración del tamaño de las fendas considerado por la norma ISO 4628-4.

Tabla 14. Clasificación de las fendas según ISO 4628-4.

Clase	Número de fendas	Tamaño de las fendas
0	No visibles	No visibles con lupa de 10 aumentos
1	Fendas aisladas, difícilmente visibles y solo en la superficie	Visibles con lupa de 10 aumentos
2	Pequeñas fendas, claramente visibles en la superficie	Visibles a simple vista
3	Número moderado de fendas	Claramente visibles a simple vista
4	Gran número de fendas	Grandes fendas con anchura de hasta 1 mm
5	Elevadísimo número de fendas	Grandes fendas con anchura superior a 1 mm

En la Tabla 15 se recoge el sistema de valoración del nivel de pudrición observado considerado por la norma EN 252:2015.

Tabla 15. Clasificación de la pudrición observada, de acuerdo con la norma EN 252:2015.

Rating	Classification	Definition
0	Sin ataque	Ningún cambio perceptible por los medios a disposición del inspector en el campo. Si solo se observa un cambio de color, se calificará como 0.
1	Ataque ligero	Cambios perceptibles, pero muy limitados en su intensidad y su posición o distribución: cambios, que sólo se manifiestan externamente por degradación superficial, siendo el ablandamiento de la madera el síntoma más común.
2	Ataque moderado	Cambios claros: ablandamiento de la madera a una profundidad de al menos 2 mm sobre una superficie que cubra al menos 10 cm <sup>2</sup> , o ablandamiento a una profundidad de al menos 5 mm sobre una superficie inferior a 1 cm <sup>2</sup> .
3	Ataque severo	Cambios severos: deterioro marcado en la madera a una profundidad de al menos 3 mm sobre una superficie más ancha (cubriendo al menos 25 cm <sup>2</sup> ), o ablandamiento a una profundidad de al menos 10 mm sobre una superficie más limitada.
4	Fallo	Fallo por impacto de la muestra en campo.

En cuanto al análisis de susceptibilidad al agrietamiento de las diferentes especies de madera, la hipótesis inicial expuesta en el trabajo de Conde *et al.* (2021a) fue la de considerar que esta susceptibilidad podría establecerse mediante el uso del coeficiente de anisotropía (relación entre contracción tangencial y radial) y la anisotropía absoluta

(diferencia entre la contracción total tangencial y radial). Los valores de ambos coeficientes para las diferentes especies de madera consideradas en el presente estudio quedan reflejados en la Tabla 16. Estos valores se obtuvieron según la metodología ISO 4469.

Tabla 16. Propiedades físicas de la madera que afectan a su comportamiento higroscópico.

Propiedad	Norma	Pino silvestre	Pino laricio	Pino radiata	Abeto rojo	Eucalipto	Castaño	fuelle
Coef. de anisotropía	ISO 4469	1,8	1,5	1,8	2,2*	2,3	2,2	Fdez-Golfín y Conde (2007) Bengtsson (2001)
Anisotropía absoluta	ISO 4469	3,2	2,6	3,3	3,0	5,7	4,3	

Paralelamente a este trabajo y con motivo de la observación de que las muestras de madera de los pinos radiata y silvestre, ubicadas en las estaciones de Asturias-Llames y Vitoria, parecían exhibir un comportamiento a la sorción invertido respecto al observado en las otras cuatro estaciones, se llevó a cabo un detallado análisis de las posibles causas (Fernández-Golfín *et al.*, 2016, contribución nº1 en 4.3.5.2). Lo primero que se observó fue que, aunque se había tenido gran cuidado en que todas las muestras fueran de corte tangencial, las muestras de pino radiata en las estaciones de Asturias-Llames y Vitoria presentaban anillos de crecimiento que incidían con la cara superior de la pieza con un ángulo de 45°, mientras que las muestras de la misma especie en el resto de estaciones lo hacía perpendicularmente (corte radial). Por el contrario, las muestras de pino silvestre en todas las localidades eran de corte tangencial puro. En la Figura 18 puede verse un esquema de la disposición de anillos en las muestras de los pinos silvestre y radiata ubicadas en las seis localidades bajo análisis.

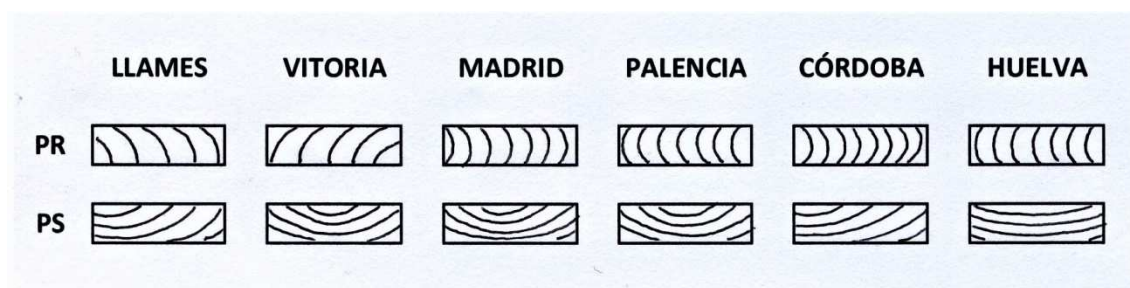


Figura 18. Corte transversal de las muestras de pino silvestre (PS) y radiata (PR) en las distintas ubicaciones.

En la Figura 19 se observa el comportamiento invertido de ambas especies de madera en las dos ubicaciones comparado con el resto de las estaciones.

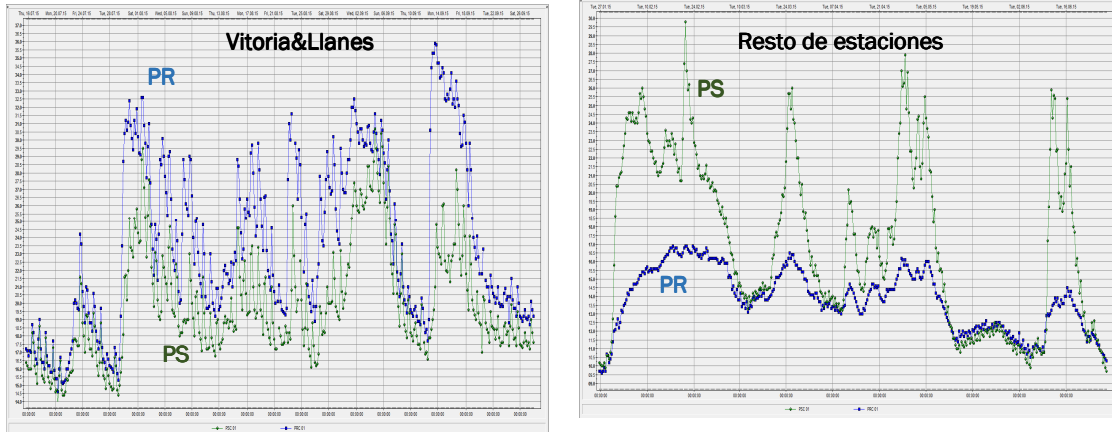


Figura 19. Comportamiento a la sorción de los pinos silvestre y radiata en Asturias y Vitoria (izqda.) y el resto de estaciones (dcha.). MC (%) vs fecha de toma de datos diarios.

Para poder analizar la causa de este comportamiento invertido y comprobar la hipótesis de partida de que era debido al diferente comportamiento a la sorción de la madera de estas especies según su tipo de corte, se diseñó una metodología consistente en introducir probetas de madera de ambas especies, de dimensiones 100x100x20 mm<sup>3</sup> con anillos de crecimiento a 90° y 45° en una cámara climática provista con un sistema de lluvia artificial (Figura 20). Para evitar el efecto de las testas, todos los cantos fueron sellados con pintura plástica. Los ensayos fueron llevados a cabo a una temperatura constante de 25°C y el contenido de humedad de la madera fue monitorizado cada hora mediante el empleo de los mismos dispositivos Scantronik empleados en los dispositivos ubicados al exterior. Para conseguir un mejor reparto de la lluvia (que se reprodujo por goteo y no por pulverización) entre la probeta de madera y el exterior se colocó un fieltro de algodón que recogía el agua y la distribuía por toda la superficie de la probeta.

El sistema de lluvia artificial se activaba durante 1 minuto a la hora en tres días consecutivos a la semana. El periodo seco se componía de cuatro días sin lluvia a 25°C/50%HR. Este ciclo fue repetido tres veces y el experimento completo otras tres.



Figura 20. Detalle de cámara climática con dispositivo de lluvia artificial.

#### 4.3.3.2. Resumen de resultados

La Tabla 17 recoge un resumen anual, por especie y localidad, de los principales resultados obtenidos. Los datos recogidos son los siguientes:

- “Rt”: Precipitación anual, en mm
- “NR”: Número total de días/año con precipitación  $\geq 0,2$ mm
- “NR10”: Número total de días/año con precipitación  $\geq 10$  mm
- “NR50”: Número total de días/año con precipitación  $\geq 50$  mm
- “NMC18”: Número total de días/año con MC  $\geq 18\%$
- “NMC18R”: Valor relativo del número total de días/año con MC  $\geq 18\%$  con respecto a la especie de referencia (SP-Abeto rojo), calculado para cada localidad. Para la especie de referencia (SP) el valor de NMC18R siempre será 1.00
- “Aver\_NMC18R”: Valor medio de NMC18R por especie para los tres años analizados (2016, 2017, 2018)
- “SP”: Especies de madera (EU-Eucalipto, PL-Pino laricio, SP-Abeto rojo, PR-Pino radiata, CS-Castaño)

Tabla 17. Resumen de datos anuales de clima meteorológico y de material, agrupados por localidad y especie.

Localidad	SP	Año	Rt	NR	NR10	NR50	NMC18	NMC18R	Aver_NMC18R	Localidad	SP	Año	Rt	NR	NR10	NR50	NMC18	NMC18R	Aver_NMC18R	
Llames	EU	2016	979,5	156	105	67	21	0,06	0,07	Huelva	EU	2016	559,2	61	52	32	18	0,26		
Llames	EU	2017	1239,6	174	131	74	20	0,05		Huelva	EU	2017	513,7	33	30	17	13	0,25	0,27	
Llames	EU	2018	1281,3	182	134	76	30	0,08		Huelva	EU	2018	588,0	85	61	33	28	0,29		
Llames	PL	2016					313	0,95		Huelva	PL	2016					60	0,88		
Llames	PL	2017					349	0,96	0,96	Huelva	PL	2017					50	0,94	0,91	
Llames	PL	2018					356	0,98		Huelva	PL	2018					88	0,90		
Llames	SP	2016					330	1,00		Huelva	SP	2016					68	1,00		
Llames	SP	2017					365	1,00	1,00	Huelva	SP	2017					52	1,00	1,00	
Llames	SP	2018					365	1,00		Huelva	SP	2018					98	1,00		
Llames	PS	2016					324	0,98		Huelva	PS	2016					70	1,03		
Llames	PS	2017					363	0,99	0,99	Huelva	PS	2017					57	1,08	1,04	
Llames	PS	2018					360	0,99		Huelva	PS	2018					99	1,01		
Llames	PR	2016					319	0,97		Huelva	PR	2016					59	0,87		
Llames	PR	2017					363	1,00	0,98	Huelva	PR	2017					46	0,87	0,87	
Llames	PR	2018					358	0,98		Huelva	PR	2018					86	0,88		
Llames	CS	2016					169	0,51		Huelva	CS	2016					32	0,47		
Llames	CS	2017					201	0,55	0,54	Huelva	CS	2017					22	0,42	0,44	
Llames	CS	2018					208	0,57		Huelva	CS	2018					43	0,44		
Localidad	SP	Año	Rt	NR	NR10	NR50	NMC18	NMC18R	Aver_NMC18R	Localidad	SP	Año	Rt	NR	NR10	NR50	NMC18	NMC18R	Aver_NMC18R	
Vitoria	EU	2016	683,1	162	110	39	33	0,18		Córdoba	EU	2016	597,4	73	61	37	24	0,35		
Vitoria	EU	2017	613,9	130	90	40	35	0,19	0,19	Córdoba	EU	2017	339,3	48	40	22	15	0,39	0,40	
Vitoria	EU	2018	693,6	167	120	50	49	0,21		Córdoba	EU	2018	619,7	92	67	36	38	0,45		
Vitoria	PL	2016					185	0,98		Córdoba	PL	2016					61	0,88		
Vitoria	PL	2017					180	0,96	0,98	Córdoba	PL	2017					33	0,87	0,91	
Vitoria	PL	2018					230	0,98		Córdoba	PL	2018					83	0,99		
Vitoria	SP	2016					188	1,00		Córdoba	SP	2016					69	1,00		
Vitoria	SP	2017					187	0,80	1,00	Córdoba	SP	2017					38	1,00	1,00	
Vitoria	SP	2018					235	1,00		Córdoba	SP	2018					84	1,00		
Vitoria	PS	2016					191	1,02		Córdoba	PS	2016					74	1,07		
Vitoria	PS	2017					191	1,02	1,02	Córdoba	PS	2017					42	1,11	1,09	
Vitoria	PS	2018					243	1,03		Córdoba	PS	2018					91	1,08		
Vitoria	PR	2016					186	0,99		Córdoba	PR	2016	597,4	73	61	37	52	0,75		



Vitoria	PR	2017					181	0,97	0,99	Córdoba	PR	2017	339.3	48	40	22	32	0.84	0.81
Vitoria	PR	2018					239	1.02		Córdoba	PR	2018	619.7	92	67	36	70	0.83	
Vitoria	CS	2016					100	0.53		Córdoba	CS	2016	597.4	73	61	37	22	0.32	
Vitoria	CS	2017					95	0.51	0.51	Córdoba	CS	2017	339.3	48	40	22	11	0.29	0.32
Vitoria	CS	2018					115	0.49		Córdoba	CS	2018	619.7	92	67	36	30	0.36	
<b>Localidad</b>	<b>SP</b>	<b>Año</b>	<b>Rt</b>	<b>NR</b>	<b>NR10</b>	<b>NR50</b>	<b>NMC18</b>	<b>NMC18R</b>	<b>Aver_NMC18R</b>	<b>Localidad</b>	<b>SP</b>	<b>Año</b>	<b>Rt</b>	<b>NR</b>	<b>NR10</b>	<b>NR50</b>	<b>NMC18</b>	<b>NMC18R</b>	<b>Aver_NMC18R</b>
Palencia	EU	2016	353.8	95	63	22	47	0.27		Madrid	EU	2016	453.5	92	67	34	45	0.36	
Palencia	EU	2017	187,7	60	40	14	25	0,30	0,29	Madrid	EU	2017	283,8	58	36	14	10	0,37	0,37
Palencia	EU	2018	531,4	120	89	36	58	0,30		Madrid	EU	2018	522,3	103	75	32	41	0,39	
Palencia	PL	2016					149	0,87		Madrid	PL	2016					115	0,91	
Palencia	PL	2017					70	0,83	0,85	Madrid	PL	2017					25	0,93	0,91
Palencia	PL	2018					168	0,86		Madrid	PL	2018					96	0,91	
Palencia	SP	2016					172	1,00		Madrid	SP	2016					126	1,00	
Palencia	SP	2017					84	1,00	1,00	Madrid	SP	2017					27	1,00	1,00
Palencia	SP	2018					196	1,00		Madrid	SP	2018					106	1,00	
Palencia	PS	2016					166	0,97		Madrid	PS	2016					135	1,07	
Palencia	PS	2017					78	0,93	0,95	Madrid	PS	2017					29	1,07	1,07
Palencia	PS	2018					190	0,97		Madrid	PS	2018					113	1,07	
Palencia	PR	2016					146	0,85		Madrid	PR	2016					110	0,87	
Palencia	PR	2017					66	0,79	0,82	Madrid	PR	2017					24	0,89	0,89
Palencia	PR	2018					162	0,83		Madrid	PR	2018					95	0,90	
Palencia	CS	2016					55	0,32		Madrid	CS	2016					42	0,33	
Palencia	CS	2017					25	0,30	0,32	Madrid	CS	2017					10	0,37	0,37
Palencia	CS	2018					70	0,36		Madrid	CS	2018					42	0,40	

De igual manera, la Tabla 18 recoge un resumen de los valores relativos obtenidos por especie (respecto de la especie de referencia) y localidad para el conjunto de los tres años. Esta Tabla es de utilidad para el cálculo de la resistencia crítica  $D_{crit}$ , ya que recoge el sumatorio, por localidad, del número de días/año con MC superior o igual al 18%, umbral crítico adoptado en este trabajo, así como la suma de los valores meteorológicos para el conjunto de los tres años analizados. Los datos incluidos son los siguientes:

- “SCI”: Valor del índice Scheffer original de cada localidad (sin condensaciones)
- “ $\Sigma T_{med}$ ”: Suma (tres años) de las temperaturas medias mensuales
- “ $\Sigma NT_{30}$ ”: Suma (tres años) del número de días con temperatura  $\geq 30^{\circ}\text{C}$
- “ $\Sigma NT_{<10}$ ”: Suma (tres años) del número de días con temperatura  $< 10^{\circ}\text{C}$
- “ $\Sigma Rt$ ”: Suma (tres años) de las precipitaciones anuales
- “ $\Sigma NR$ ”: Suma (tres años) del número total de días/año con precipitación  $\geq 0.2\text{mm}$
- “ $\Sigma NR_{10}$ ”: Suma (tres años) del número total de días/año con precipitación  $\geq 10\text{ mm}$
- “ $\Sigma NR_{50}$ ”: Suma (tres años) del número total de días/año con precipitación  $\geq 50\text{ mm}$
- “ $NR_{50R}$ ”: Porcentaje del número de días con precipitación  $\geq 50\text{ mm}$  ( $\Sigma NR_{50}$ ) con respecto al número total de días de lluvia  $\geq 0.2\text{mm}$  ( $\Sigma NR$ ). Este valor es una medida de la naturaleza torrencial de la precipitación. Conforme mayor sea este valor mayor será la torrencialidad.

Tabla 18. Resumen de datos climáticos, meteorológicos y de material, para el conjunto de los tres años analizados (2016, 2017, 2018).

Especies	LOCALIDADES (valores medios de NMC18R)					
	Llames	Vitoria	Palencia	Madrid	Córdoba	Huelva
PL	0,96	0,98	0,85	0,91	0,91	0,91
PR	0,98	0,99	0,82	0,89	0,81	0,87
PS	1,02	1,02	0,95	1,07	1,09	1,04
SP	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
EU	0,07	0,19	0,29	0,37	0,40	0,27
CS	0,54	0,51	0,32	0,37	0,32	0,44
Especies	LOCALIDADES ( $\Sigma$ NMC18)					
SP	1060	610	452	259	191	218
Clima (3 años)						
SCI	42	24	10	10	14	14
$\Sigma T_{med}$	528,2	437,9	424,2	547,9	649,3	517,6
$\Sigma NT_{30}$	0	1	1	17	81	13
$\Sigma NT_{<10}$	148	451	507	392	174	57
$\Sigma Rt$	3500,4	1990,6	1072,9	1259,6	1557,9	1661,0
$\Sigma NR$	512	459	275	253	213	179
$\Sigma NR_{10}$	370	320	192	178	168	143
$\Sigma NR_{50}$	217	129	72	80	95	82
$\Sigma NR_{70}$	174	84	53	59	71	71
$NR_{50R}$ (%)	42	28	26	32	45	46

Los datos de clima de material contenidos en las Tablas 17 y 18 han sido obtenidos por suma (mensual, anual, trianual) de los valores calculados con las lecturas diarias tomadas a las 12:00 am, para el MC y la temperatura de la madera.

Si se comparan los valores promedio del índice de Sheffer (SCI) calculados usando los registros climáticos tomados en cada sitio de exposición de muestras durante los tres años (2016, 2017 y 2018) con los datos históricos de cada localidad de exposición (Tabla 10), se puede observar que el clima durante el período considerado de tres años fue más seco que el considerado como medio en la serie histórica, lo que resultó en una reducción notable en el valor del índice de Sheffer y por lo tanto en el riesgo de pudrición en todas las ubicaciones. Solo este hecho explica la ausencia de pudrición en las muestras de madera en cualquiera de las localizaciones, excepto la observada a finales de 2018 en pino radiata

en el dispositivo ubicado en Asturias-Llames, y todo ello a pesar de la presencia de niveles de agrietamiento de clase 3-4 (número moderado de fendas a gran número de fendas) de la Tabla 14, en todos los dispositivos excepto en el de Asturias-Llames.

Debido a la ausencia generalizada de pudrición en las diferentes ubicaciones, por el momento, es imposible desarrollar un modelo predictivo que establezca la posible relación entre el número de días con contenido de humedad superior al 18% (NMC18) y el inicio de la pudrición, según la especie de madera y la ubicación. Por lo tanto, el estudio efectuado hasta ahora solo evalúa el riesgo de pudrición en términos relativos, al emplear el número de días con contenido de humedad superior al 18% (NMC18 en la Tabla 17) como indicador de riesgo y comparando los valores de NMC18 para cada especie con respecto a los valores promedio para el abeto rojo (SP) en cada lugar.

Se eligió el abeto rojo como base para la comparación porque esta especie es la que se ha considerado como de referencia en los estudios efectuados hasta el momento para evaluar tanto el valor de la dosis crítica  $D_{crit}$  (Isaksson *et al.*, 2015; Meyer-Veltrup y Brischke, 2017) como de los índices de  $k_{wa}$  (Brischke *et al.*, 2014; Isaksson *et al.*, 2015).

A excepción de las zonas costeras (Asturias-Llames y en menor medida Huelva) o las afectadas por fuentes de humedad cercanas (Vitoria, con grandes lagos cercanos al dispositivo), el grado de agrietamiento en todas las muestras de madera se puede clasificar como de moderado a gran número de fendas (clase 3-4), aunque con diferencias entre especies.

Entre las especies de coníferas, especialmente en los sitios con climas continentales intensos (Palencia, Madrid, Córdoba), la madera de pino silvestre fue la que presentó a finales de 2018 mayor nivel de agrietamiento (clase 4), seguida por el pino radiata (clase 3) y el pino laricio (también clase 3 pero con menos fisuras que el pino radiata). El abeto rojo presentó un nivel intermedio de agrietamiento (clase 3), similar al del pino laricio. Esta conclusión concuerda con la de Meyer-Veltrup *et al.* (2016) sobre la alta susceptibilidad al agrietamiento del pino silvestre, pero no confirma la hipótesis inicial propuesta al comienzo del trabajo sobre el efecto directo del coeficiente de anisotropía y la anisotropía absoluta (Tabla 16) sobre el comportamiento frente al agrietamiento. Esta diferencia de comportamiento en las muestras evaluadas con respecto al comportamiento teórico esperado sugiere que en la práctica la susceptibilidad al agrietamiento también puede depender de otros factores como la microestructura, composición química o la permeabilidad.

Se puede observar una diferencia notable en el comportamiento de las maderas de frondosas frente a las de coníferas, siendo la intensidad de agrietamiento mucho menor en las primeras, a pesar de presentar valores superiores del coeficiente de anisotropía y de la anisotropía absoluta. El eucalipto presenta una gran cantidad de grietas cortas y poco profundas (clase 2), mientras que el castaño tiene muy pocas grietas, aunque más largas y profundas (clase 1). Esta diferencia en el nivel observado de agrietamiento entre las especies de frondosas y coníferas puede deberse al mayor número de elementos anatómicos transversales y a la menor permeabilidad de las frondosas en estudio, lo que se evidencia por los valores más bajos de NMC18 en todas las ubicaciones, siendo las variaciones extremas en el MC mucho menos frecuentes.

Dado que se seleccionaron piezas con fibra recta en todos los casos, ninguna presentó alabeos.

En cuanto a los valores relativos, con respecto al abeto rojo, del número total de días con un contenido de humedad superior al 18% (NMC18R), parte superior de la Tabla 18, se puede deducir lo siguiente:

1. En el caso de las maderas de coníferas (PS, PL, PR, SP):
  - a) En general, los valores para las tres especies de pino (PL, PS, PR) reflejan un comportamiento similar, ya que los valores del índice relativo son cercanos a uno, siendo PR en Córdoba el que presenta un valor más alejado.
  - b) Como era de esperar, las maderas más permeables (pino laricio (PL) y especialmente pino radiata (PR)) parecen presentar valores de NMC18R más bajos en aquellas localidades donde la suma de las temperaturas medias mensuales es más cálida (valores de  $\Sigma T_{med}$  más altos) y donde hay más eventos de alta temperatura, representados por mayores valores de  $\Sigma NT30$  (Madrid, Córdoba y Huelva). En estos lugares, el índice de riesgo torrencial representado por el valor NR50R también es mayor. Este efecto se puede explicar por la corta duración de los eventos de lluvia (2 días en promedio) y la larga duración de los períodos secos, así como con la mayor capacidad de secado de PL y PR que conduce a valores reducidos de MC durante más días al año (valores de NMC18 en la Tabla 17). En el emplazamiento de Huelva estos valores son menos apreciables que en Córdoba y Madrid debido al efecto de proximidad al mar, que conduce a una mayor humedad relativa media anual y, por tanto, a una tasa de secado más lenta y a un menor número de fendas (por menores variaciones anuales en los valores de MC).
2. En el caso de las maderas de frondosas (EU y CS):
  - a) La reducida capacidad de humectación del eucalipto conduce a valores más bajos de NMC18 en todas las ubicaciones, siendo este efecto mucho más evidente en aquellas que presentan mayor precipitación (Asturias-Llames y Vitoria). El secado más rápido de la madera de castaño en comparación con la de eucalipto conduce a valores más bajos de NMC18 en los lugares con menor precipitación (Palencia, Madrid, Córdoba y Huelva).
  - b) La velocidad de secado más lenta de la madera de eucalipto también da como resultado un menor agrietamiento en comparación con la del castaño, no solo debido a diferencias más pequeñas entre el MC máximo y mínimo, sino también a valores más bajos de tensiones de secado.

No es posible determinar el efecto del agrietamiento en el riesgo de pudrición de la madera expuesta a condiciones exteriores analizando solo los valores absolutos y relativos de NMC18 obtenidos en las diferentes localidades. Tampoco es posible confirmar el planteamiento de Meyer-Veltrup *et al.* (2016) con respecto a la influencia limitada del agrietamiento en el MC de la madera exterior. Por lo tanto, el diferente comportamiento observado entre las especies solo puede atribuirse a la diferente capacidad de humectación y secado junto con su susceptibilidad al agrietamiento. Por consiguiente, los valores de NM18R presentados en las Tablas 17 y 18 solo pueden usarse para obtener un valor conjunto, denominado factor de especie ( $k_{wa}$ ).

Los valores de  $k_{wa}$  propuestos en este estudio para las especies consideradas corresponden al inverso de los valores máximos de NMC18R para cada especie, tomando en consideración las seis localizaciones analizadas en su conjunto. Estos valores se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19. Valores de  $k_{wa}$  propuestos para las especies en estudio.

Especie	$k_{wa}$
PL	1,03
PR	1,01
PS	0,92
SP	1,00
EU	2,51
CS	1,84

De acuerdo con estos datos, parecería lógico utilizar, por simplicidad, un valor común de 1,0 para todas las coníferas analizadas, 2,51 para el eucalipto y 1,84 para el castaño.

Con respecto al estudio sobre la influencia del tipo de aserrado en el comportamiento a la sorción de la madera y, con ello, en el riesgo de pudrición, la Figura 21 recoge gráficamente los resultados medios del comportamiento observado en las especies en las que este estudio ha sido posible por contar con muestras con diferente tipo de corte.

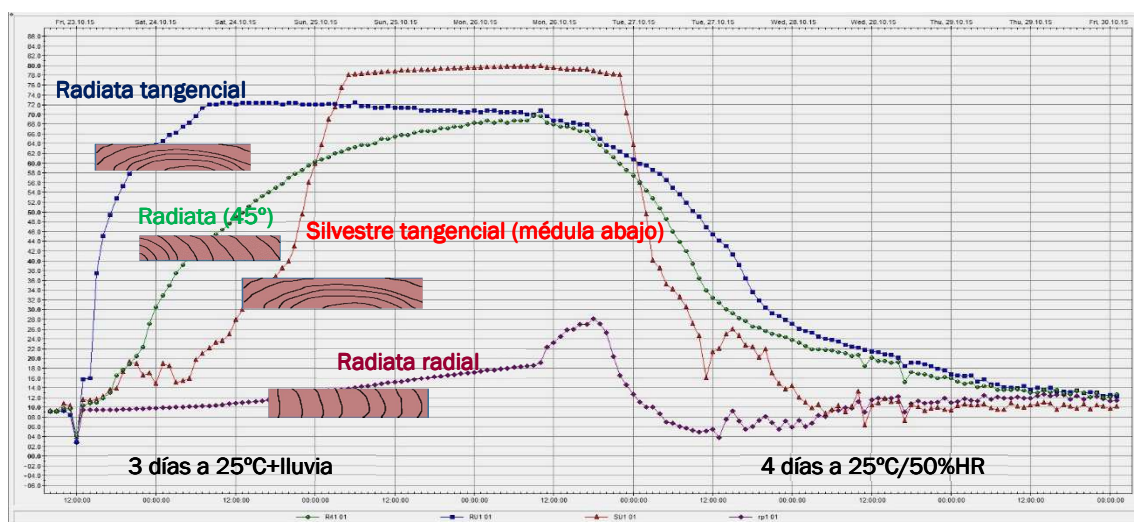


Figura 21. Comportamiento a la sorción observado según especie y tipo de aserrado (Fernández-Golfín *et al.*, 2016b, en 4.3.5.2.). MC (%) vs fecha de toma de datos diarios.

#### 4.3.3.3. Principales conclusiones

De lo analizado en el apartado anterior es posible extraer algunas conclusiones:

- 1) El factor especie parece tener una influencia decisiva en la resistencia a la pudrición de la madera expuesta a la intemperie porque afecta significativamente al número de días al año en los que la madera tiene altos valores de contenido de humedad. Así lo confirman los datos obtenidos para las especies de frondosas, eucalipto y castaño, consideradas en este estudio. Sin embargo, no se ha confirmado en el caso de las especies de coníferas estudiadas, ya que su comportamiento es muy similar entre sí, así como, con la especie de referencia, el abeto rojo.
- 2) La diferencia observada en el comportamiento de la madera de las diferentes especies de coníferas en los lugares estudiados puede deberse a su diferente capacidad de humectación y secado y, en menor grado, a su susceptibilidad al agrietamiento. La intensidad del efecto de cada una de estas variables no se pudo verificar, aunque los datos obtenidos parecen apuntar a un efecto limitado de las fendas, principalmente asociado a la generación de incrementos cortos, intensos y no reales en el contenido medio de humedad. Todas las localidades, a excepción de las del clima más húmedo (Asturias-Llames, Vitoria y en menor medida, Huelva) presentan niveles de presencia de grietas muy similares, por lo que el distinto comportamiento de la madera de las diferentes especies en estas localizaciones solo puede deberse a las diferencias en la capacidad de humectación y secado.
- 3) En función de los resultados obtenidos, se puede deducir que el efecto “físico” del factor especie sobre la resistencia a la pudrición de los hongos debe tomarse en cuenta en su conjunto, que, según Isaksson *et al.* (2013, 2015) y Meyer-Veltrup & Brischke (2017), es el llamado factor de especie.

- 4) A la vista de estos de estos resultados, se propone emplear un valor de 1.0 como “factor de especie” para las cuatro coníferas estudiadas, de 2,51 para el eucalipto y de 1,84 para el castaño.
- 5) Respecto de la influencia del tipo de aserrado en el comportamiento de la madera a la sorción, los resultados permiten concluir que el orden de permeabilidad por tipo de corte es el siguiente: Radial (90°)<Intermedio (45°)<Tangencial (médula abajo)
- 6) A igualdad de tipo de corte (tangencial con la médula abajo), la permeabilidad de la madera de pino radiata es mayor que la de pino silvestre.

#### 4.3.4. Contribución del candidato

Durante la ejecución del proyecto BIA2013-42434-R, de *Evaluación del comportamiento funcional de la madera maciza en condiciones de uso exterior sin contacto con el suelo*, en cuyo seno se han generado los datos necesarios para el análisis del efecto relativo de la especie en el riesgo de pudrición de la madera, la doctoranda se responsabiliza del montaje, instalación y seguimiento de los dispositivos experimentales distribuidos por la geografía peninsular así como de la preparación de la base de datos de evolución del clima del material, por especies y localidades. Junto a los directores de la Tesis y restantes miembros del equipo investigador del proyecto, la candidata interviene en la conceptualización, redacción y revisión del artículo [1] del apartado 4.3.5.1.

Con respecto al segundo de los trabajos presentados, la contribución a congresos referenciada en el apartado 4.3.5.2, la doctoranda se responsabiliza del montaje, instalación y seguimiento del dispositivo experimental, del registro de los datos de evolución del contenido de humedad de las diferentes muestras. Junto con los directores de la Tesis y restantes miembros del equipo investigador del proyecto, la candidata interviene en la conceptualización, preparación y defensa de la contribución.

#### 4.3.5. Artículos y contribuciones efectuadas

##### 4.3.5.1. Artículos científicos referenciados (en negrita la candidata, subrayados los directores)

1. **Conde García, M.**, Conde García, M., Fernández-Golfín, J.I., 2021a. Species effect on decay resistance of wood exposed to exterior conditions above the ground in Spain. *Materiales de Construcción*, 71 (341), e236. ISSN: 0465-2746. 2021 Impact Factor: 0,623 59/196-Q2 (SJR) Cat: Building and construction. <https://doi.org/10.3989/mc.2021.11320>

##### 4.3.5.2. Contribuciones en Congresos

1. Fernández-Golfín, J.I., Galván, J., **Conde, M.**, Conde, M., 2016. Effect of sawing pattern and species on the permeability to water of two conifers: radiata and Scots pine. Comunicación en COST ACTION F9 1303 Workshop “*Designing with bio-based building materials: Challenges and opportunities*”. Madrid, 24 y 25 de febrero de 2016.



## 4.4. Caracterización del efecto del diseño constructivo en la evaluación de la exposición de la madera

### 4.4.1. Introducción

En el modelo propuesto para la comprobación del efecto del diseño en la durabilidad de la madera, basado en el empleo de la inequación [1], el miembro izquierdo es independiente del material y se calcula considerando la carga de degradación inducida por el macro, meso y microclima, correspondientes al lugar y uso previstos, pero modificado teniendo en cuenta ciertos aspectos del diseño que influyen en el clima del material.

$$\text{Exposición} \leq \text{Resistencia} \quad [1]$$

De acuerdo con lo visto en el capítulo 3 y siguiendo lo propuesto por Thelandersson *et al.* (2011), posteriormente redefinido por Fernández-Golfín *et al.* (2018), este miembro izquierdo de la inequación debe ser calculado haciendo uso de la siguiente expresión:

$$I_{Sk} = (I_{S0} * k_{s1}) * k_{s2} * k_{s3} * k_{s4} * k_{s5} * k_{s6} * C_a \quad [2]$$

Donde  $I_{Sk}$  es el índice característico de exposición,  $I_{S0}$  representa el índice básico de exposición y  $k_{s1}$  es el factor de exposición básica. El producto  $(I_{S0} * k_{s1})$  ha de ser modificado mediante diversos factores que tienen en cuenta las diversas contribuciones del diseño al agravamiento o reducción de la exposición básica. Entre los factores que se sugiere emplear (Fernández-Golfín *et al.*, 2018) para tener en cuenta el efecto del diseño se pueden citar los siguientes:

- $k_{s2}$ : factor por geometría del elemento, que mayor o menor la exposición en función de la geometría y naturaleza del elemento (madera sólida, laminada, encolada) para tener en cuenta su mayor o menor facilidad de secado completo.
- $k_{s3}$ : factor que tiene en cuenta la presencia de aleros, sus características y orientación respecto de los vientos dominantes de lluvia.
- $k_{s4}$ : factor que tiene en cuenta el efecto debido a la distancia del elemento de madera respecto del suelo, que tiene en cuenta el riesgo de humectación por salpicado o nieve.
- $k_{s5}$ : factor por diseño constructivo, que mayor o menor la exposición en función de su capacidad para retener o dejar fluir y secar rápidamente el agua de lluvia. Su valor se establece en función de la disposición relativa del elemento (horizontal o vertical), de la presencia y diseño de las uniones, del nivel de ventilación del elemento, etc.
- $k_{s6}$ : factor a emplear en situaciones especiales que se dan en proyectos de rehabilitación. Tiene en cuenta la forma en la que se resuelve el encuentro de los elementos estructurales de madera con los muros de fachada, el estado sanitario de estos o la clase higrométrica de los locales.
- $C_a$ : Factor de calibración, que deberá ser obtenido contrastando los datos experimentales con los estimados.

En la ecuación [2] el producto entre  $I_{S0}$  y  $k_{s1}$  aparece entre paréntesis ya que  $k_{s1}$  solo tiene en cuenta el agravamiento de la exposición por razones de exposición exclusivamente climática. A este producto se le puede denominar índice de exposición mesoclimática (Fernández-Golfín *et al.*, 2018), puesto que ambos términos sólo caracterizan la exposición climática del elemento de madera.

Los primeros valores que figuran en la bibliografía para los factores  $k_{s3}$  a  $k_{s5}$  se deben a Thelandersson *et al.* (2011), que los establecieron sobre la base de la opinión de expertos,



así como por la información publicada en las guías de diseño constructivo de la FWPA australiana (Wang *et al.*, 2007).

Con el fin de llevar a cabo una comprobación experimental de la validez de los factores propuestos, diversos autores (Brischke *et al.*, 2008; Borneman *et al.*, 2012; Isaksson y Thelandersson, 2013; Humar *et al.*, 2019; Niklewski *et al.*, 2019; Niklewski y Fredricksson 2019; Conde *et al.*, 2021b) han analizado el comportamiento de la madera en diversas soluciones constructivas, especialmente fachadas y suelos al exterior, aunque mayoritariamente efectuados en climas del norte de Europa, proponiendo valores de los coeficientes anteriormente señalados.

De momento no existen valores universalmente aceptados para estos coeficientes ( $k_{si}$ ) ni normas de carácter transnacional (CEN, ISO) que los incluyan. Lo mismo ocurre con el cálculo de la dosis de degradación inducida por el clima meteorológico, por lo que puede afirmarse que el método de cálculo del miembro denominado “Exposición” en la inecuación [1] está todavía en fase de desarrollo.

#### 4.4.2. Contribución al estado del arte

Sobre el efecto del diseño en la modificación de la dosis de exposición y como consecuencia en el riesgo de pudrición de la madera al exterior, la bibliografía analizada contiene diversos trabajos efectuados en climas centroeuropeos.

Brischke *et al.* (2008) analizaron el efecto de tres configuraciones distintas de voladizo (12 cm, 62 cm y 112 cm) en el contenido de humedad de un revestimiento de madera aserrada de abeto rojo (*Picea abies*) en un dispositivo experimental ubicado en Taastrup (Dinamarca). El revestimiento estudiado se encontraba orientado al norte para evitar el efecto directo tanto de la insolación como de los vientos dominantes de lluvia de la zona y ventilado por su cara interior. El borde inferior del revestimiento se encontraba 15 cm sobreelevado respecto del suelo para evitar el efecto del salpicado de la lluvia. Para medir la evolución del contenido de humedad de la madera se instalaron 18 pares de sensores a dos alturas diferentes (65 y 170 cm respecto del suelo). El equipamiento usado para la medición del contenido de humedad fue un dispositivo tipo *Materialfox mini* de Scanntronik. Este equipo de medida tiene la particularidad de que solo puede medir valores del contenido de humedad por encima del 15%. Los autores encontraron que el MC variaba entre el 15% (valor mínimo de medida) y el 30% a lo largo del año pero que los valores críticos por encima del 25% tan solo aparecían en el periodo entre noviembre y marzo, aunque al estar en esos meses la temperatura por debajo de 2°C los autores concluyeron que el riesgo de pudrición era reducido. Los autores tabularon el número de días en los que el contenido de humedad de la madera se situaba por encima del 20%, 23%, 27% y 30%, por posición y tamaño de los aleros (Tabla 20), encontrando diferencias significativas entre los valores obtenidos en la zona alta del revestimiento respecto de los obtenidos en la zona baja solo cuando el alero era de tamaño elevado (112 cm).

Tabla 20. Distribución del número de días con MC mayor que un umbral en función de la posición del detector y del tamaño de alero considerando un tiempo total de exposición de 1145 días (Brischke *et al.*, 2008).

Roof overhang (cm)	Facade	Days				
		MC > 20%	MC > 23%	MC > 25%	MC > 27%	MC > 30%
112	Upper	456	263	56	2	0
	Bottom	608	447	252	34	0
62	Upper	526	373	194	30	0
	Bottom	557	416	286	81	0
12	Upper	550	425	304	119	5
	Bottom	555	444	299	103	3

De acuerdo con estos valores el efecto protector del alero dependía de su tamaño y de la posición de detección del MC. En este trabajo los autores no efectuaron propuesta alguna sobre el factor reductor de la exposición en función del tamaño del alero ( $k_{s3}$ ) aunque los datos fueron posteriormente reanalizados por Borneman *et al.* (2012).

Borneman *et al.* (2012) trabajaron sobre varios dispositivos experimentales. El primero de ellos estaba específicamente diseñado para integrar tanto revestimientos verticales como suelos horizontales, así como diferentes especies. En este caso los autores consideraron dos orientaciones distintas para los revestimientos, norte y sur.

Un segundo dispositivo experimental utilizado se componía de cuatro revestimientos verticales montados en el exterior de una caseta específicamente diseñada para ello y ubicada en Hannover (Alemania). En este caso la madera empleada fue la de abeto rojo (*Picea abies*). Los revestimientos verticales en este último dispositivo se encontraban sobre elevados 5 cm del suelo y orientados hacia los cuatro puntos cardinales, no existiendo además aleros. El contenido de humedad fue monitorizado en siete alturas distintas y en todas las orientaciones.

Adicionalmente a estos dispositivos experimentales los autores reevaluaron los datos obtenidos en el trabajo de Brischke *et al.* (2008).

Respecto a la orientación, los autores concluyen que no parece existir una clara relación entre esta y la dosis de degradación acumulada por la madera, aunque sí se evidencia que la orientación sur es la que más carga climática incorpora, con más días críticos. Pese a su carácter no significativo los autores ponen de manifiesto que la irradiación solar más elevada y las mayores cargas de viento en la fachada orientada al sur fomentaron el secado. Por lo tanto, las especies de madera permeables, como la albura del pino silvestre, presentaban más valores extremos (valores elevados y reducidos) en la fachada orientada al sur (también más sometida a los vientos dominantes de lluvia), mientras que las especies de madera refractaria, como el alerce, mostraron más "días críticos" (valores elevados) en la orientación norte, donde el secado fue inhibido por menos cargas de viento y menos irradiación solar. En este sentido, los autores ponen de manifiesto el efecto que tiene el nivel de insolación en el riesgo de pudrición y agrietamiento de la madera, como también lo harían posteriormente Fernández-Golfín *et al.* (2016).

Con respecto al efecto de la distancia al suelo, los autores concluyeron que las mayores cargas de humedad y, en consecuencia, el mayor riesgo de pudrición se encontraba en alturas de entre 5 y 10 cm, donde las salpicaduras de agua conducían a una mayor entrada de humedad y la menor velocidad del viento dificultaba el secado de la madera. En general, la carga de humedad disminuyó con la distancia creciente respecto del suelo, aunque esta tendencia no se observó de manera constante para las cuatro orientaciones y las tres especies de madera. Llama la atención que la cantidad de "días críticos" (valores elevados) fue extremadamente pequeña para la albura de pino silvestre en la fachada este y sur, lo que podría explicarse porque su alta permeabilidad conduce tanto a una alta absorción de humedad, como a un fácil secado al mismo tiempo.

En cuanto al efecto de los voladizos, los autores concluyen que el MC de la zona inferior de los revestimientos fue 5 veces mayor que el MC de la zona superior bajo voladizo, de gran tamaño. En este sentido el tamaño del voladizo modifica el perfil de MC con la altura, estando más zona protegida con la disposición de voladizo elevado. Los autores no propusieron modelo o regla alguna referida a la extensión de la zona protegida en función del tamaño del alero, limitándose a describir el efecto protector de este.

Isaksson y Thelandersson (2013) compararon entre sí el comportamiento de piezas de madera aserrada de abeto rojo (*Picea abies*) con las medidas de referencia de 22x95x500 mm<sup>3</sup>, ubicadas al exterior en Lund (Suecia). Se disponían en posición horizontal sobre apoyos y ventiladas a sus cuatro caras (ensayo de referencia), así como en posición vertical

unidas con diferentes detalles de uniones a piezas de la misma sección colocadas horizontalmente. En el estudio se emplearon diversas dimensiones transversales de los elementos de madera (22x95, 45x95 y 95x95 mm<sup>2</sup>) para analizar el efecto de la sección y la superficie expuesta.

Finalmente se expusieron al clima exterior durante un año, trece detalles diferentes, registrándose el contenido de humedad cada hora junto con los datos meteorológicos. Como medida del efecto de retención de humedad por parte de los diferentes tipos de uniones y elementos se empleó el número de días, durante un año, con contenido de humedad superior al 25%. De acuerdo con los autores, el número de días con MC>25% varió desde 0 para las muestras colocadas horizontalmente sin trampas de agua (muestras de referencia) a 135 para las muestras en las que las uniones generaban zonas de atrapamiento de humedad.

La idea básica del trabajo llevado a cabo por estos autores era poder relacionar el contenido de humedad medido en las cercanías de cada diseño y tipo de elemento con el de las muestras de referencia y de esta forma analizar el efecto que en el contenido de humedad tenían las diferentes condiciones de retención de agua de lluvia que cada diseño imponía.

Los autores comprobaron empíricamente que la forma más eficiente de llevar a cabo la comparación entre configuraciones de ensayo era usando la relación de los contenidos de humedad de cada detalle en estudio con el de referencia.

Además, constataron que las relaciones eran bastante constantes durante el período de tiempo observado, con lo que propusieron una serie de factores para ajustar el comportamiento conocido del material de referencia a las diferentes características de diseño. Por practicidad, propusieron agrupar detalles de diseño con comportamiento similar utilizando una única constante para cada grupo. En la Tabla 21 se recogen los coeficientes finalmente propuestos.

Tabla 21. Relación entre el detalle “i” y el detalle de referencia determinado como la media de ratios. Las dos columnas de la derecha muestran una comparación del número de días con MC> 25% basado en datos y el predicho empleando el índice sobre la lectura del contenido de humedad de la pieza de referencia.

Detail i	Ratio to detail 1	MC >25% data	MC >25% predicted
1 reference	1	0	0
2 reference, sheltered	0.90	0	0
3 vertical board west	0.92	0	0
3 vertical board east	0.92	0	0
3 vertical board south	0.93	0	0
3 vertical board north	0.98	0	0
4 reference inclined	1.02	0	0
5 dimension, surface	0.90	0	0
5 dimension, middle	1.05	0	0
5 dimension, end grain	1.16	80	0
6 contact area 45 × 95 mm <sup>2</sup> , horizontal, side grain	1.25	87	44
7 contact area 95 × 95 mm <sup>2</sup> , horizontal, side grain	1.32	113	112
8 contact area 45 × 95 mm <sup>2</sup> , vertical, side grain	1.26	96	57
9 contact area 95 × 95 mm <sup>2</sup> , vertical, side grain	1.21	93	12
10 contact area 45 × 95 mm <sup>2</sup> , horizontal, side grain	1.26	97	57
10 contact area 45 × 95 mm <sup>2</sup> , horizontal, end grain	1.19	22	5
11 contact area 45 × 95 mm <sup>2</sup> , vertical, side grain	1.35	130	130
11 contact area 45 × 95 mm <sup>2</sup> , vertical, end grain	1.27	53	70
12 contact area 45 × 95 mm <sup>2</sup> , vertical, gap 3 mm	1.01	0	0
13 contact area 45 × 95 mm <sup>2</sup> , vertical, gap 6 mm	1.11	14	0

El umbral del índice que lleva a generar días con un contenido de humedad > 25% es de 1,17. El número total de días analizados es 367 y la precipitación se registró durante 153 días.

Además de los factores de modificación propuestos, la principal conclusión que puede extraerse de este estudio es que las áreas de contacto entre piezas de madera prolongan significativamente en el tiempo valores de contenido de humedad elevados y, por ello, es necesario prestar una atención preferente a su diseño cuando la madera trabaja al exterior.

Humar *et al.* (2019) estudiaron el comportamiento de suelos de madera al exterior durante un periodo de cinco años. En su estudio analizaron el comportamiento de 19 especies de madera, así como de 11 materiales adicionales que, teniendo base madera, incorporaban diversos tratamientos mejoradores de la durabilidad (madera termotratada, madera impregnada con ceras, tratada con cobre o con acabados superficiales en base agua). El dispositivo experimental fue instalado en Ljubljana (Eslovenia). Su objetivo no fue el de analizar el comportamiento *per se* de los suelos sino el de validar con ellos el modelo de Meyer-Veltrup *et al.* (2017).

Al igual que Isaksson y Thelandersson (2013), los autores definieron *día húmedo* (condiciones en las que la actividad fúngica es máxima) como aquel en el que el MC es igual o superior al 25% estando la temperatura entre 4 y 40°C. No obstante, los autores

indican que este umbral del 25%, puede variar en función de la madera o material que se esté analizando, dependiendo especialmente del valor de su Punto de saturación de las Fibras, el cual según Meyer-Veltrup y Brischke (2015) y Popper y Niemz (2009) puede oscilar entre el 22% y el 36%, siendo notablemente inferior en las maderas termotratadas. La Tabla 22 recoge, en forma de porcentaje, el número de días/año con MC superior o igual a 25% para las diferentes maderas sin tratar.

Tabla 22. % de días con medidas del  $MC \geq 25\%$  en suelos de madera sin tratar (Humar et al., 2019).

Material	% de días con $MC \geq 25\%$
Abeto rojo ( <i>Picea abies</i> )	31,8%
Albura de Pino silvestre ( <i>Pinus sylvestris</i> )	84,0%
Duramen de Pino silvestre ( <i>Pinus sylvestris</i> )	25,0%
Alerce europeo ( <i>Larix decidua</i> )	21,4%
Fresno europeo ( <i>Fraxinus excelsior</i> )	2,8%
Castaño europeo ( <i>Castanea sativa</i> )	18,0%
Roble europeo ( <i>Quercus sp.</i> )	10,9%

Humar et al. (2019) no establecieron factores modificadores de la exposición en los elementos dispuestos horizontalmente y, por ello, sus resultados son de gran interés metodológico, pero no práctico, desde el punto de vista aquí perseguido.

Niklewski et al. (2019), en lo que a factores de diseño se refiere, trabajaron haciendo uso de dos modelos dosis-respuesta sobre el efecto de las juntas en el agravamiento de la exposición, obteniendo un valor del factor de entre 1,7 y 2,0 respecto de la exposición de la pieza horizontal de referencia, valor que está en línea con lo establecido por Thelandersson et al. (2011). Los resultados obtenidos por estos autores dependían del modelo de dosis empleado, lo que los lleva a concluir sobre la necesidad de verificar la precisión de los modelos con ensayos a escala real ubicados en diferentes climas y con diferentes tipos de diseños como paso previo para la obtención de valores más precisos para los factores de agravamiento de la exposición.

Niklewski y Frederiksson (2019) trabajaron sobre el efecto de las juntas, modelizando su comportamiento mediante modelos bidimensionales de difusión y contrastando sus resultados con datos experimentales procedentes tanto de laboratorio como de exposición exterior (dispositivo experimental de Fredriksson et al., 2016). Estos autores concluyen que la exposición está intensamente afectada por el área de contacto y que los valores más críticos del MC se producen en las inmediaciones de la junta. Una conclusión de gran relevancia para los climas mediterráneos, con marcada alternancia entre periodos secos y húmedos, radica en que el efecto relativo de las juntas es más acusado en estos climas que en los climas más lluviosos, en los que el factor se sitúa alrededor del 1,0. Basados en este argumento, los autores explican por qué en algunos estudios (de Groot, 1992), llevados a cabo en climas tropicales, el efecto de las juntas parece no ser significativo, pero sí en los climas templados.

En este ámbito, en el artículo Conde et al. (2021b), artículo 1 en el apartado 4.4.5.1, se analiza la evolución del contenido de humedad de los elementos de madera en diferentes posiciones, extrayendo conclusiones respecto de los valores que estos factores deberían tomar para la climatología de Madrid, sobre un dispositivo experimental ubicado en esta localidad y específicamente diseñado para analizar el efecto de la posición relativa (vertical vs. horizontal) de los elementos de madera, la existencia de aleros así como de la separación respecto del suelo.

### 4.4.3. Resumen de los trabajos

#### 4.4.3.1. Metodología

Para evaluar y predecir el comportamiento a largo plazo del contenido de humedad de elementos de madera afectados por diferentes factores de diseño, en marzo de 2016 se construyó en Madrid una instalación experimental. El dispositivo experimental (figura 4.12) constaba de dos pilares de madera de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L., procedencia Valsaín) sin tratar, con una sección transversal de 90x70 mm<sup>2</sup> y una longitud total de 2250 mm. Los dos pilares se colocaron a 1580 mm de distancia entre sí y se unieron mediante una pieza horizontal superior de las mismas dimensiones. Esta pieza horizontal también fue realizada con madera de pino silvestre sin tratar. La viga horizontal sobresalía de los pilares 300 mm en cada extremo. Los pilares se insertaron directamente en el suelo hasta una profundidad de 500 mm.

Para dotar de rigidez a la estructura y evaluar el efecto de las juntas (valoración no incluida en el presente estudio), se colocaron dos tornapuntas, también de madera de pino silvestre sin tratar, de 90x70x500 mm<sup>3</sup> en un ángulo de 45°, uniendo la viga a los pilares.

Para minimizar el efecto de la orientación geográfica, la viga horizontal se colocó en dirección Norte-Sur. El efecto de orientación se evitó en el presente estudio insertando todos los sensores de humedad en la cara Este de los elementos de madera monitoreados, excepto el sensor 1 que se colocó en la cara Sur.

Finalmente, para evaluar el efecto del alero en la evolución del contenido de humedad, se colocó un tablero de contrachapado de 600x600 mm<sup>2</sup> en el extremo sur de la viga horizontal, enrasado con su extremo y extendiéndose 255 mm en cada lado, protegiendo así parcialmente los lados sur, este y oeste del pilar sur (factor alero) para asegurar mejor la protección por alero.

El contenido de humedad se midió de forma continua mediante el método de resistencia eléctrica según la norma EN 13183-2:2002 en ubicaciones representativas, seleccionadas para capturar los efectos tanto de las medidas de protección adoptadas como de las trampas de humedad implicadas. La ubicación de cada sensor de humedad se seleccionó de acuerdo con el efecto a evaluar. Los sensores de humedad se muestran en la Figura 22, siendo las funciones de cada uno las siguientes:

- Sensor 1. Pilar sur, colocado inmediatamente por debajo de la parte voladiza de la viga para evitar cualquier riesgo de efecto de condensación del tablero de contrachapado utilizado como alero. La orientación no tiene efecto en esta posición ya que ni el sol ni la lluvia afectan la zona. Función: Evaluar el efecto protector de los aleros mediante comparación con las medidas del sensor 2.
- Sensor 2. Pilar sur, colocado a 700 mm de la cara inferior del alero y orientado hacia el este. Función: Evaluar el contenido de humedad en elementos colocados verticalmente más allá del efecto de los aleros. La posición seleccionada del punto de medición 2 con respecto al tablero contrachapado (700 mm) se determinó mediante mediciones manuales del contenido de humedad tomadas tras eventos de lluvia a lo largo de 2016 en ambos pilares, buscando el lugar desde el cual el contenido de humedad se volvía sustancialmente constante (finalización del efecto alero). Esto hizo posible utilizar la diferencia en las mediciones del contenido de humedad tomadas en los puntos 1 y 2 como indicador del efecto alero en el sensor 1. Debido a la importancia de la medida en el sensor 2 (es la base de la evaluación de todos los factores considerados en el presente estudio), mensualmente se verificó la exactitud de la medida monitoreada automáticamente (fuera de eventos de lluvia) comparándola con la medida tomada manualmente (GANN RTU 600) en el punto T ubicado en el pilar norte (Figura 22). El control se realizó con medidas tomadas a las 12:00 am.

- Sensor 3. Pilar sur, colocado a 200 mm del suelo y orientado al este. Función: Evaluar el efecto de la proximidad al suelo mediante la comparación con las medidas del sensor 2. Se seleccionó esta separación del suelo por ser la indicada como segura en el DB-SEM del Código Técnico de la Edificación (Ministerio de Fomento, 2009). No se consideró utilizar barreras ni sistemas que impidieran el ascenso capilar del agua a través de los pilares para reproducir muchas de las situaciones reales que ocurren en la práctica constructiva y para simular y evaluar este efecto en la madera incrustada en muros húmedos (vigas).
- Sensor 4. Ubicado en el elemento horizontal, orientado al este. Función: Evaluar el efecto de la posición (vertical vs. horizontal) mediante la comparación con las medidas en el punto 2.

Para monitorear el contenido de humedad en cada uno de los puntos seleccionados del dispositivo experimental y así evaluar el efecto de las diferentes variables de diseño, se utilizaron sensores tipo clavo, compuestos por dos clavos de acero GANN modelo 31004550, recubiertos de Teflón. Estos clavos fueron insertados en la madera en la dirección longitudinal con respecto a las fibras, hasta una profundidad de 20 mm. La distancia entre los dos electrodos de cada sensor fue de 25 mm.

El contenido de humedad de cada punto de medición se registró cada dos horas utilizando un dispositivo de registro de datos instalado dentro de una caja protectora para evitar la acción del agua sobre los equipos. El dispositivo utilizado para medir y registrar el contenido de humedad de la madera estaba compuesto por un sensor de humedad de ocho canales (Tipo Gigamodule, de Scanntronik GmbH) y un registrador de datos (Tipo Thermofox, de Scanntronik GmbH), que se han empleado comúnmente en otros estudios similares realizados a nivel europeo.

Para determinar la temperatura de la madera, se insertó un sensor de temperatura tipo RTD en el pilar sur (junto al punto de medición número 2 (Figura 22), registrando la temperatura al mismo tiempo que el contenido de humedad.

Para obtener datos de alta calidad y evitar errores de medición, se monitoreó continuamente el funcionamiento del dispositivo de medición (Gigamodule) conectando una resistencia calibrada de 10 Megaohmios al canal 8. Además, se realizaron controles mensuales mediante dispositivos manuales (GANN RTU600) para medir el contenido de humedad de cada punto de medición, utilizando sensores de contenido de humedad similares a los utilizados para las mediciones primarias. Así, se realizó una comparación mensual entre las medidas primarias y secundarias, teniendo en cuenta el criterio de aceptación de diferencias máximas de  $\pm 2\%$ . Todas las mediciones manuales se tomaron en ausencia de eventos de lluvia activos. Todas las mediciones estuvieron dentro del umbral de aceptación.

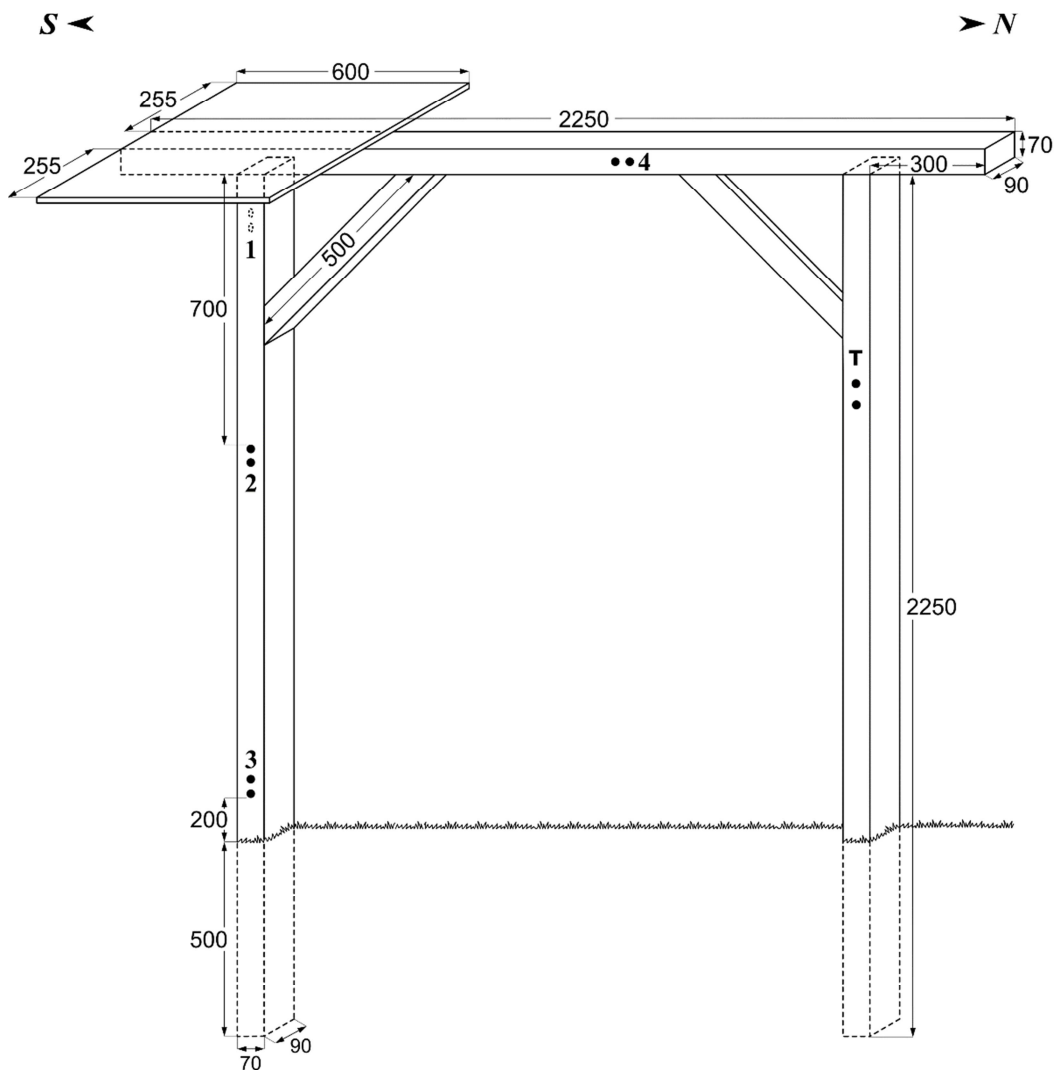


Figura 22. Vista general del dispositivo de ensayo con medidas en mm (Conde et al., 2021b).

Todas las medidas de contenido de humedad registradas por el Gigamodule fueron corregidas para una temperatura de 20°C. Para tomar en consideración el efecto de las especies en las mediciones del contenido de humedad se utilizó el modelo resistencia eléctrica-contenido de humedad específico del pino silvestre (Conde et al., 2021c).

Para asignar cada detalle constructivo a una clase de uso de la norma EN 335, se utilizó la siguiente metodología de dos pasos:

- 1) Cálculo del valor medio del índice mensual de exposición básico de la zona obtenido mediante el criterio de asignación considerado en la Tabla 23 en función del valor medio mensual del MC (sistema de puntuación solo aplicable a madera maciza).
- 2) Asignación de la clase de uso en función del valor obtenido para el índice medio mensual de exposición básico y los criterios contemplados en la Tabla 24.



Tabla 23. Asignación del índice de exposición básico en función del MC (Conde et al., 2021b).

Intervalo de MC (%)	Índice	Comentarios
≥25	4,0	Fast development of fungi. Extreme risk of decay
≥22-25	3,5	Threshold for high risk of fungi and termite attacks
≥20-22	3,2	Moderate risk of fungi and termite attacks
≥18-20	3,0	Start of risk of fungi and termite attacks. 18% is the upper threshold for Service Class 2 (solid wood)
≥16-18	2,7	Reduced risk of fungal attack
≥14-16	2,5	No risk of fungi and termite attacks
≥12-14	2,0	No risk of fungi and termite attacks .12% is the upper limit for Service Class 1 (solid wood)
≥10-12	1,0	No risk of fungi and termite attacks
≥9-10	0,9	No risk of fungi and termite attacks
≥8-9	0,8	No risk of fungi and termite attacks
<8	0,7	Moisture content incompatible with fungi survival

Tabla 24. Criterios para la asignación de la clase de uso.

Valor del índice	Asignación Clase uso	Comentarios
0-0,7	CU1	Al interior de las construcciones. Sin lluvia. Sin condensaciones
>0,7-1,3	CU2	Sólo bajo cubierta. Sin lluvia. Condensaciones infrecuentes
>1,3-1,7	CU3.1	Expuesta
>1,7	CU3.2	Expuesta

Los valores del índice según los intervalos de contenido de humedad (MC) (Tabla 23) y los criterios para la asignación a clases de uso (Tabla 24) provienen de la experiencia y trabajo previo del equipo de investigación y han sido utilizados con éxito para la asignación de clases de uso de la norma EN 335 en situaciones reales mediante la Herramienta Excel construida específicamente para este objetivo (contribución 1 del apartado 4.4.5.2).

#### 4.4.3.2. Resumen de resultados

La Tabla 25 recoge un resumen de los valores medios mensuales de MC obtenidos de cada sensor, indicando los valores máximo y mínimo. También incluye los valores de temperatura media mensual del aire (TAV), precipitación mensual total (Pt), número total de días con más de 0,2 mm de lluvia (Nt), días con más de 0,2 mm pero menos de 1 mm de lluvia (N02), más de 1 mm pero menos de 5 mm (N10) o más de 5 mm (N50). Además, se incluyen los valores promedio de la humedad relativa del aire (HR), junto con los valores promedio mensuales calculados para el contenido de humedad de equilibrio (EMC). Todos los valores climatológicos incluidos corresponden a los publicados por la Agencia Española de Meteorología (AEMET) para la estación meteorológica de la Ciudad Universitaria, ubicada a 1 km del lugar del experimento.

Tabla 25. Resumen de la media mensual, valores máximo y mínimo del MC por sensor, valor medio del contenido de humedad de equilibrio (EMC) y de los valores climatológicos de la estación (Conde et al., 2021b).

Mes	MC1 <sub>MAX</sub> (%)	MC1 <sub>AV</sub> (%)	MC1 <sub>MIN</sub> (%)	MC2 <sub>MAX</sub> (%)	MC2 <sub>AV</sub> (%)	MC2 <sub>MIN</sub> (%)	MC3 <sub>MAX</sub> (%)	MC3 <sub>AV</sub> (%)	MC3 <sub>MIN</sub> (%)	MC4 <sub>MAX</sub> (%)	MC4 <sub>AV</sub> (%)	MC4 <sub>MIN</sub> (%)	T <sub>AV</sub> (°C)	P <sub>t</sub> (mm)	N <sub>t</sub> (días)	N <sub>02</sub> (días)	N <sub>10</sub> (días)	N <sub>50</sub> (días)	RH (%)	EMC (%)
En-17	15,0	14,4	14,3	19,1	16,3	15,8	21,2	17,1	16,5	27,8	21,3	20,4	5,1	20,4	3	1	1	1	63,0	12,1
Feb-17	15,3	14,9	14,3	17,7	17,3	16,1	19,1	18,7	17,3	29,2	23,9	21,0	7,4	51,0	11	3	4	4	65,0	12,5
Mar-17	14,6	13,4	12,3	16,0	14,7	13,7	16,8	15,7	14,8	25,5	20,3	17,3	10,5	16,7	7	1	6	0	53,0	10,1
Abr-17	12,5	11,1	10,2	14,0	12,2	11,0	15,2	13,6	12,7	19,5	16,4	14,4	14,7	13,2	7	2	5	0	41,0	7,9
May-17	10,7	9,9	9,0	11,6	10,8	9,8	14,0	12,4	11,5	19,0	14,9	12,3	19,1	29,9	5	1	2	2	39,0	7,5
Jun-17	8,9	7,9	7,6	9,7	8,7	8,2	11,3	10,6	10,3	13,1	12,2	10,8	25,6	11,2	5	4	0	1	34,0	6,5
Jul-17	10,7	7,7	6,6	11,5	8,5	7,0	14,0	10,7	9,8	19,0	11,1	8,8	25,8	61,1	4	1	1	2	34,0	6,5
Ago-17	7,7	6,7	6,3	12,1	7,6	7,1	15,7	10,0	9,4	18,9	9,0	7,6	26,1	22,7	3	2	0	1	38,0	7,1
Sep-17	7,8	7,0	6,9	8,0	7,8	7,6	10,4	9,9	9,7	10,0	8,8	8,6	20,8	0,0	0	0	0	0	39,0	7,4
Oct-17	10,0	7,8	6,9	16,5	10,4	8,0	20,0	12,9	9,8	24,8	13,4	8,6	17,6	28,8	3	2	0	1	47,0	8,8
Nov-17	10,9	9,7	8,7	14,7	11,2	10,4	18,0	13,0	11,7	23,8	14,9	12,5	9,4	8,9	4	2	1	1	53,0	10,1
Dic-17	11,9	11,1	10,7	18,0	13,6	11,7	23,4	16,4	12,6	28,0	18,3	12,5	6,1	19,9	6	3	2	1	59,0	11,3
En-18	15,7	13,2	11,8	19,5	15,5	13,0	26,0	19,8	14,8	31,4	22,9	17,9	6,6	50,2	9	3	2	4	68,0	13,2
Feb-18	15,9	13,5	12,5	19,0	16,3	13,8	26,9	22,2	17,2	29,8	24,6	19,2	5,5	67,2	5	0	1	4	54,0	10,4
Mar-18	15,7	14,0	11,3	23,0	20,5	15,6	29,5	25,2	18,0	33,0	27,3	18,6	8,6	148,3	19	1	9	9	59,0	11,3
Abr-18	11,8	11,0	10,1	19,6	15,9	10,5	25,0	18,8	11,5	32,0	23,0	15,7	12,5	56,5	14	3	7	4	54,0	10,2
May-18	11,8	9,6	7,6	17,2	10,9	8,2	20,5	12,1	8,9	26,7	13,2	9,0	16,5	51,6	14	7	5	2	46,0	8,7
Jun-18	11,8	9,6	7,6	17,2	10,9	8,2	20,5	12,1	8,9	26,7	13,2	9,0	21,9	34,1	3	0	1	2	43,0	8,0
Jul-18	7,4	6,7	6,3	8,1	7,5	7,2	10,4	9,5	8,6	9,8	8,7	8,1	25,5	0,0	0	0	0	0	36,0	6,8
Ago-18	7,1	6,6	6,3	7,4	7,1	6,9	9,4	9,2	8,8	8,8	7,8	7,4	27,5	0,6	1	1	0	0	38,0	7,0
Sep-18	7,8	7,1	6,5	8,6	7,3	7,0	10,7	9,0	8,2	14,5	8,6	7,5	23,9	2,4	3	2	1	0	45,0	8,3
Oct-18	10,5	9,3	7,1	13,0	10,8	7,4	16,5	13,3	9,1	24,4	17,3	8,0	15,0	42,2	14	2	10	2	55,0	10,3
Nov-18	12,4	11,5	10,4	18,0	15,4	11,1	23,7	19,3	14,0	27,1	22,8	17,2	10,1	59,7	17	6	7	4	67,0	12,9
Dic-18	12,3	12,1	12,0	19,0	14,7	14,0	22,2	18,3	16,5	27,0	21,0	19,5	7,2	9,5	4	3	0	1	66,0	12,7
En-19	13,3	12,7	12,3	18,3	15,2	14,0	22,0	17,6	16,0	27,4	19,6	16,7	6,0	9,8	3	1	1	1	56,0	10,8
Feb-19	13,2	12,3	11,4	17,7	13,4	11,7	22,5	16,4	14,9	26,9	18,7	16,1	8,2	0,5	1	1	0	0	50,0	9,6
Mar-19	11,8	10,7	9,6	15,3	11,9	10,5	21,3	15,1	13,3	26,1	16,8	13,8	11,4	7,7	2	1	0	1	45,0	8,7
Abr-19	11,3	10,9	10,3	16,9	14,8	12,5	23,2	19,3	14,5	28,4	22,9	15,3	12,2	70,1	12	3	5	4	51,0	9,7
May-19	10,2	8,9	7,8	12,2	9,9	8,6	15,6	12,2	10,5	17,1	12,0	10,5	18,7	1,5	1	0	1	0	41,0	7,8
Jun-19	8,1	7,3	6,9	11,6	8,4	7,6	15,2	10,5	9,6	16,7	9,7	8,2	23,7	1,2	1	0	1	0	36,0	6,9
Jul-19	7,3	7,0	6,9	10,5	8,3	7,6	14,6	10,7	9,4	16,4	10,5	7,3	27,3	3,4	5	4	1	0	34,0	6,4
Ago-19	7,1	6,5	6,3	11,2	7,5	6,7	14,6	9,7	8,2	17,3	10,8	8,4	25,3	82,3	5	2	1	2	39,0	7,3
Sep-19	7,5	6,8	6,6	11,7	8,7	7,5	15,6	10,9	9,3	19,4	12,7	9,1	20,6	28,3	5	1	2	2	45,0	8,4
Oct-19	9,0	7,8	6,9	14,8	10,4	7,7	19,6	12,9	9,1	25,1	15,4	9,3	15,6	37,4	9	2	4	3	54,0	10,1
Nov-19	11,7	10,3	8,9	17,7	14,1	10,7	23,2	17,3	12,5	26,2	20,1	14,2	9,4	38,2	13	2	8	3	63,0	12,0
Dic-19	13,0	12,5	11,9	22,1	17,0	14,6	28,7	20,4	16,2	30,8	22,7	17,5	8,4	85,0	12	4	5	3	64,0	12,3

Parte de la información de la Tabla 25 se puede ver gráficamente en la Figura 23 (a) y (b), que describen la evolución en el tiempo de las variables MC4AV,  $N_t$ ,  $N_{50}$  y  $P_t$ .

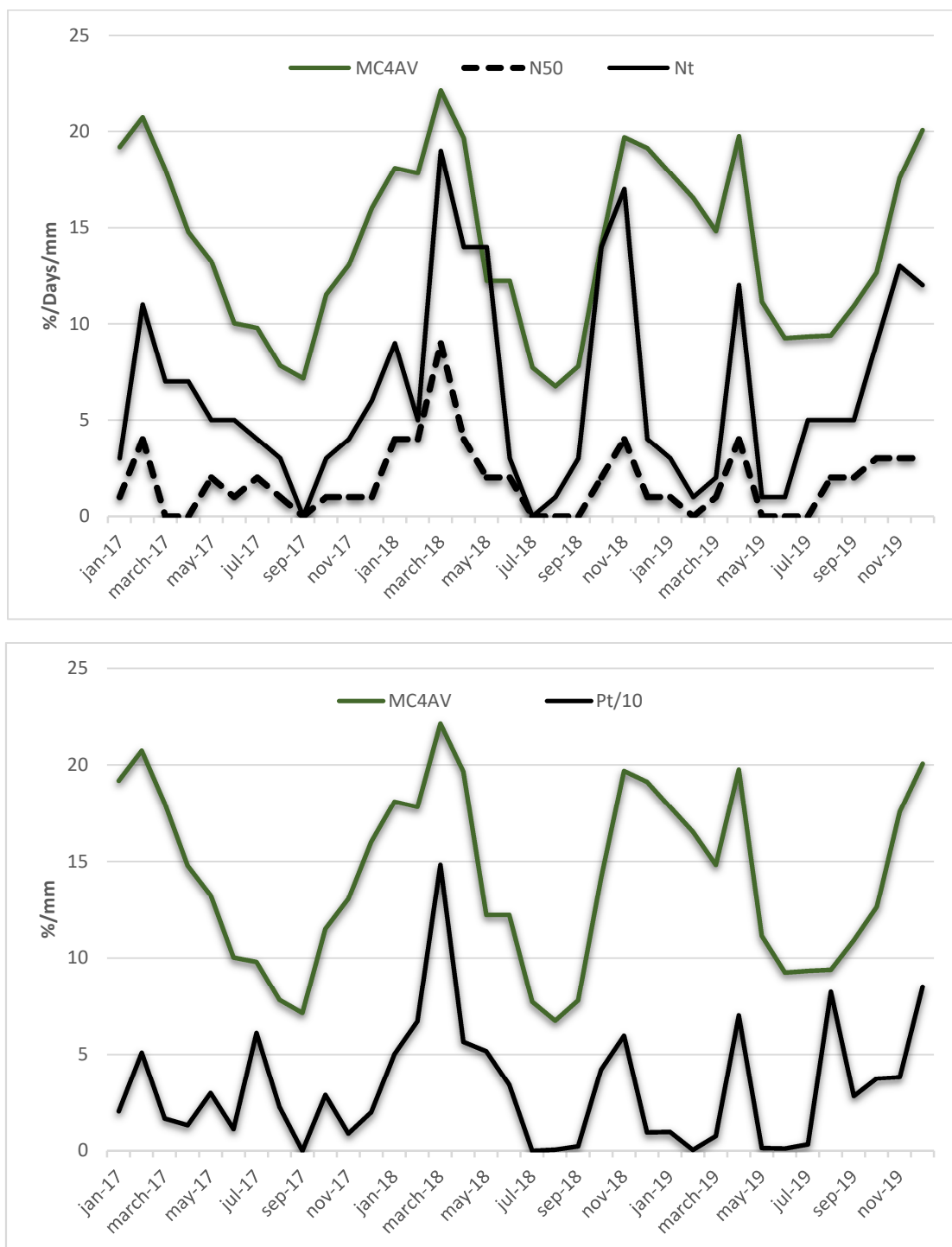


Figura 23. (a) Evolución con el tiempo del MC medio del sensor 4 (MC4AV), del número total de días de lluvia ( $N_t$ ) y del número de días con lluvia de más de 5 mm ( $N_{50}$ ). (b) Evolución con el tiempo del MC medio del sensor 4 (MC4AV) y de la precipitación total ( $P_t/10$ ).

Analizando los datos de la Tabla 25 y la Figura 23 se puede observar que la precipitación total ( $P_t$ ) no parece ser el factor que más afecta ni el que mejor se relaciona con el contenido de humedad (reflejado en este caso por el valor de MC4AV, correspondiente al

elemento horizontal). Como se puede apreciar gráficamente, la evolución mensual de las variables  $N_t$  y  $N_{50}$  están más relacionadas que  $P_t$  con la evolución mensual del contenido de humedad (MC4AV).

La Tabla 26 muestra un resumen de los valores mensuales calculados para el número de días con un contenido de humedad superior al 12% (N12), 18% (N18), superior al 22% (N22) o superior al 25% (N25), para cada uno de los sensores de medición. El número de días con un contenido de humedad mayor que un valor dado es un indicador fácil y útil del potencial de riesgo de pudrición y cómo las diferentes ubicaciones dentro de una estructura se ven afectadas por las variables climatológicas o de diseño. Existe cierta discusión sobre el umbral de MC más adecuado para ser usado como indicador de riesgo de pudrición. Por eso en este trabajo se han presentado los tres más habituales (18%, 22%, 25%), aunque en nuestro grupo de investigación se suele hacer uso del 18% (Conde *et al.*, 2021b).

Tabla 26. Resumen de los valores mensuales del número de días con  $MC \geq 12\%$  (N12), 18% (N18), 22% (N22) o 25% (N25), por sensor (MCX).

Mes	N12 (MC1)	N18 (MC1)	N22 (MC1)	N25 (MC1)	N12 (MC2)	N18 (MC2)	N22 (MC2)	N25 (MC2)	N12 (MC3)	N18 (MC3)	N22 (MC3)	N25 (MC3)	N12 (MC4)	N18 (MC4)	N22 (MC4)	N25 (MC4)
En-17	31	0	0	0	31	5	0	0	31	5	0	0	31	31	6	4
Feb-17	28	0	0	0	28	0	0	0	28	27	0	0	28	28	23	9
Mar-17	31	0	0	0	31	0	0	0	31	0	0	0	31	29	7	1
Abr-17	5	0	0	0	14	0	0	0	30	0	0	0	30	6	0	0
May-17	0	0	0	0	0	0	0	0	22	0	0	0	31	3	0	0
Jun-17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	0	0	0
Jul-17	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	6	3	0	0
Ago-17	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	3	1	0	0
Sep-17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oct-17	0	0	0	0	11	0	0	0	15	3	0	0	15	7	3	0
Nov-17	0	0	0	0	7	0	0	0	17	1	0	0	30	5	2	0
Dic-17	0	0	0	0	25	1	0	0	31	10	3	0	31	12	6	3
En-18	27	0	0	0	31	6	0	0	31	22	8	5	31	30	15	9
Feb-18	28	0	0	0	28	3	0	0	28	25	7	3	28	28	12	5
Mar-18	27	0	0	0	31	28	10	0	31	31	24	20	31	31	27	24
Abr-18	0	0	0	0	26	8	0	0	28	19	7	1	30	22	18	13
May-18	0	0	0	0	23	2	0	0	31	9	3	0	31	19	5	4
Jun-18	0	0	0	0	11	0	0	0	12	3	0	0	14	4	2	1
Jul-18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ago-18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sep-18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Oct-18	0	0	0	0	15	0	0	0	22	0	0	0	23	18	11	0
Nov-18	7	0	0	0	27	1	0	0	30	23	5	0	30	29	16	8
Dic-18	31	0	0	0	31	1	0	0	31	16	2	0	31	31	6	1
En-19	31	0	0	0	31	4	0	0	31	11	1	0	31	19	7	4
Feb-19	20	0	0	0	23	0	0	0	28	5	1	0	28	13	4	1
Mar-19	0	0	0	0	10	0	0	0	31	4	0	0	31	8	4	1
Abr-19	0	0	0	0	30	0	0	0	30	20	5	0	30	26	19	13
May-19	0	0	0	0	2	0	0	0	16	0	0	0	12	0	0	0
Jun-19	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	3	0	0	0
Jul-19	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	8	0	0	0
Ago-19	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	10	0	0	0
Sep-19	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	14	4	0	0
Oct-19	0	0	0	0	6	0	0	0	19	4	0	0	20	10	4	1
Nov-19	0	0	0	0	26	0	0	0	30	13	1	0	30	25	9	1
Dic-19	29	0	0	0	31	11	1	0	31	23	10	3	31	28	17	9

La Figura 24 proporciona una representación gráfica de los valores promedio mensuales de N18, N22 y N25 registrados por los sensores 1 a 4 durante los tres años del estudio. El área contenida dentro de la línea poligonal obtenida al unir todos los puntos correspondientes a un mismo nivel de riesgo (N18, N22, N25) es un indicador del riesgo potencial de pudrición.

El efecto protector de los aleros es muy evidente (MC1), ya que no existe superficie indicadora de riesgo en ningún nivel. El riesgo de pudrición asociado con una posición vertical completamente expuesta pero fuera de contacto con el suelo (MC2) es muy limitado y solo es ligeramente evidente considerando un umbral de riesgo MC del 18% (N18).

El riesgo de pudrición por la exposición vertical cerca del suelo (200 mm) pero no en contacto directo con él (MC3) es moderado, siendo mucho más evidente considerando el umbral de riesgo MC del 18% (N18). Finalmente, y para el elemento horizontal (MC4) el riesgo de deterioro es mayor, especialmente si se considera un umbral de riesgo MC del 18%, pero también es evidente con los umbrales de 22% (N22) y 25% (N25).

En cualquiera de las cuatro exposiciones consideradas se hace patente la enorme influencia que tiene el verano en las condiciones climáticas del material en Madrid, bajo las cuales los elementos de madera se secan por completo y el riesgo de pudrición se reduce a cero.

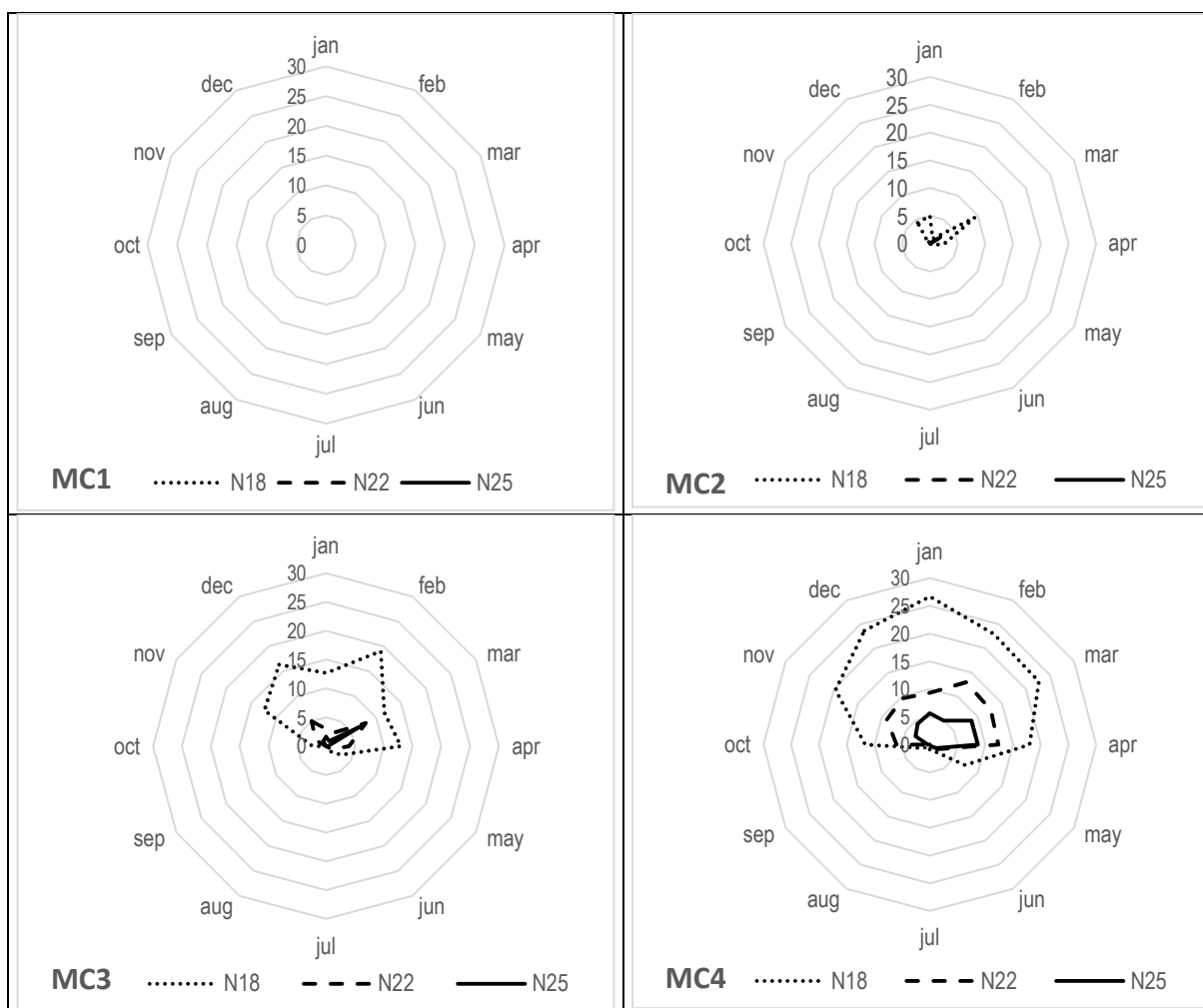


Figura 24. Representación gráfica de la media mensual del número de días con  $MC \geq 18\%$  (N18), 22% (N22) y 25% (N25), por sensor (MCX).

La Tabla 27 incluye un resumen de los valores mensuales de las diferencias de MC entre sensores (en %), que se pueden utilizar para evaluar los diferentes efectos:

- MC2-MC1: Efecto de la protección del alero
- MC3-MC2: Efecto de la distancia desde el suelo
- MC4-MC2: Efecto de la posición relativa (horizontal frente a vertical)

Tabla 27. Diferencias de MC entre sensores (en %).

<b>Mes</b>	<b>MC2-MC1</b>	<b>MC3-MC2</b>	<b>MC4-MC2</b>
<b>En-17</b>	1,9	0,8	5,0
<b>Feb-17</b>	2,4	1,4	6,7
<b>Mar-17</b>	1,4	0,9	5,6
<b>Abr-17</b>	1,1	1,4	4,2
<b>May-17</b>	0,9	1,6	4,1
<b>Jun-17</b>	0,8	1,9	3,5
<b>Jul-17</b>	0,9	2,1	2,6
<b>Ago-17</b>	1,0	2,3	1,4
<b>Sep-17</b>	0,8	2,1	1,0
<b>Oct-17</b>	2,6	2,4	2,9
<b>Nov-17</b>	1,5	1,8	3,7
<b>Dic-17</b>	2,5	2,9	4,7
<b>En-18</b>	2,3	4,3	7,4
<b>Feb-18</b>	2,9	5,8	8,3
<b>Mar-18</b>	6,4	4,8	6,8
<b>Abr-18</b>	4,8	2,9	7,1
<b>May-18</b>	1,3	1,2	2,4
<b>Jun-18</b>	1,3	1,2	2,4
<b>Jul-18</b>	0,8	2,0	1,2
<b>Ago-18</b>	0,5	2,1	0,8
<b>Sep-18</b>	0,3	1,7	1,2
<b>Oct-18</b>	1,6	2,4	6,5
<b>Nov-18</b>	3,9	3,9	7,4
<b>Dic-18</b>	2,6	3,6	6,3
<b>En-19</b>	2,5	2,4	4,3
<b>Feb-19</b>	1,1	2,9	5,3
<b>Mar-19</b>	1,1	3,2	5,0
<b>Abr-19</b>	3,9	4,5	8,2
<b>May-19</b>	1,0	2,3	2,1
<b>Jun-19</b>	1,1	2,1	1,3
<b>Jul-19</b>	1,3	2,3	2,2
<b>Ago-19</b>	1,0	2,2	3,2
<b>Sep-19</b>	1,9	2,2	4,0
<b>Oct-19</b>	2,5	2,5	5,0
<b>Nov-19</b>	3,8	3,2	6,0
<b>Dic-19</b>	4,6	3,3	5,6

Para determinar el efecto individual y aditivo de las diferentes variables se realizó un análisis con el fin de identificar correlaciones, tomando como variables dependientes las diferencias previamente señaladas, que explican los fenómenos evaluados, y como variables independientes los distintos valores de precipitación registrados. Los resultados se muestran en la Tabla 28.

Tabla 28. Efectos individuales y aditivos de las diversas variables.

Variables dependientes	Variables independientes	Coefficiente de determinación	Error standard
MC2-MC1	Pt	0,526	0,95
	TAV	0,336	1,13
	Nt	0,570	0,92
	N02	0,047	1,35
	N10	0,389	1,08
	N50	<b>0,664</b>	0,80
	HR	0,444	1,03
	Pt+TAV	0,687	0,77
	Pt+TAV+Nt	0,716	0,74
	Pt*+TAV+N50	0,738	0,72
	Pt*+TAV+N50+HR	0,734	0,71
	TAV+Nt	0,648	0,82
<b>TAV+N50</b>	<b>0,736</b>	<b>0,71</b>	
MC3-MC2	Pt	0,240	0,97
	TAV	0,151	1,03
	Nt*	0,111	1,05
	N02*	0,000	1,12
	N10	0,154	1,11
	N50	<b>0,357</b>	0,89
	HR	0,148	1,03
	Pt+TAV	0,305	0,93
	Pt+TAV+Nt*	0,299	0,93
	Pt*+TAV*+N50	0,356	0,89
	Pt*+TAV*+N50+HR*	0,348	0,90
	<b>TAV+N50</b>	<b>0,372</b>	<b>0,88</b>
MC4-MC2	Pt	0,278	1,88
	TAV	<b>0,620</b>	1,36
	Nt	0,420	1,68
	N02*	0,401	2,17
	N10	0,312	1,85
	N50	0,437	1,66
	HR	0,592	1,41
	Pt+TAV	0,730	1,15
	Pt*+TAV+Nt	0,756	1,09
	Pt*+TAV+N50	0,752	1,10
	Pt*+TAV+N50+HR*	0,746	1,12
	<b>TAV+N50</b>	<b>0,759</b>	<b>1,08</b>

\* Efecto estadísticamente no significativo

Finalmente, en la Tabla 29 se incluyen los valores del índice mensual y anual y, en consecuencia, las clases de uso asignadas a la zona de cada sensor. Estos valores de índice se calculan y las clases de uso correspondientes se asignan de acuerdo con el procedimiento de dos pasos y las metodologías de puntuación y asignación incluidas en las Tablas 23 y 24. También se incluye el factor propuesto (valores anuales y globales) para evaluar cada uno de los efectos considerados en el presente estudio (aleros, distancia al suelo y posición horizontal).

El “Valor anual del índice” de cada sensor se calcula como media de sus valores mensuales y la cifra del “Valor anual del Factor” se obtiene por división del “Valor anual del índice” correspondiente al sensor (MC1AV, MC2AV, MC3AV o MC4AV) en el que cada efecto se analiza (alero, posición relativa o distancia al suelo) y el del sensor de referencia (MC2AV). Como “Valor global del índice” se toma el valor superior entre los anuales y como “Valor global del factor” el valor máximo (menos favorable) entre los anuales.

Tabla 29. Cálculo de los valores de los índices anuales, de los factores de diseño y clases de uso asignadas.

Mes	MC1AV (%)	Valor	MC2AV (%)	Valor	MC3AV (%)	Valor	MC4AV (%)	Valor
En-17	14,4	2,5	16,3	2,7	17,1	2,7	21,3	3,2
Feb-17	14,9	2,5	17,3	2,7	18,7	3,0	23,9	3,5
Mar-17	13,4	2,0	14,7	2,5	15,7	2,5	20,3	3,2
Abr-17	11,1	1,0	12,2	2,0	13,6	2,0	16,4	2,7
May-17	9,9	0,9	10,8	1,0	12,4	1,0	14,9	2,5
Jun-17	7,9	0,7	8,7	0,8	10,6	1,0	12,2	2,0
Jul-17	7,7	0,7	8,5	0,8	10,7	1,0	11,1	1,0
Ago-17	6,7	0,7	7,6	0,7	10,0	1,0	9,0	0,9
Sep-17	7,0	0,7	7,8	0,7	9,9	0,9	8,8	0,8
Oct-17	7,8	0,7	10,4	1,0	12,9	2,0	13,4	2,0
Nov-17	9,7	0,9	11,2	1,0	13,0	2,0	14,9	2,5
Dic-17	11,1	1,0	13,6	2,0	16,4	2,7	18,3	3,0
Valor anual del índice		<b>1,2</b>		<b>1,5</b>		<b>1,8</b>		<b>2,3</b>
Clase de uso	CU2		CU3.1		CU3.2		CU3.2	
Valor anual del Factor	<b>0,8</b>		<b>0,7</b>		<b>1,2</b>			
En-18	13,2	2,0	15,5	2,5	19,8	3,0	22,9	3,5
Feb-18	13,0	2,0	15,1	2,5	20,6	3,2	22,7	3,5
Mar-18	14,0	2,5	20,5	3,2	25,2	3,5	27,3	4,0
Abr-18	11,0	1,0	15,9	2,5	18,8	3,0	23,0	3,5
May-18	9,6	0,9	10,9	1,0	12,1	2,0	13,2	2,0
Jun-18	9,6	0,9	10,9	1,0	12,1	2,0	13,2	2,0
Jul-18	6,7	0,7	7,5	0,7	9,5	0,9	8,7	0,8
Ago-18	6,6	0,7	7,1	0,7	9,2	0,9	7,8	0,7
Sep-18	7,1	0,7	7,3	0,7	9,0	0,9	8,6	0,8
Oct-18	9,3	0,9	10,8	1,0	13,3	2,0	17,3	2,7
Nov-18	11,5	1,0	15,4	2,5	19,3	3,0	22,8	3,5
Dic-18	12,1	2,0	14,7	2,5	18,3	3,0	21,0	3,2
Valor anual del índice		<b>1,3</b>		<b>1,7</b>		<b>2,3</b>		<b>2,5</b>
Clase de uso	CU2		CU3.1		CU3.2		CU3.2	
Valor anual del Factor	<b>0,7</b>		<b>0,7</b>		<b>1,3</b>			
En-19	12,7	2,0	15,2	2,5	17,6	2,7	19,6	3,0
Feb-19	12,3	2,0	13,4	2,0	16,4	2,7	18,7	3,0
Mar-19	10,7	1,0	11,9	1,0	15,1	2,5	16,8	2,7
Abr-19	10,9	1,0	14,8	2,5	19,3	3,0	22,9	3,5
May-19	8,9	0,8	9,9	0,9	12,2	2,0	12,0	2,0
Jun-19	7,3	0,7	8,4	0,8	10,5	1,0	9,7	0,9
Jul-19	7,0	0,7	8,3	0,8	10,7	1,0	10,5	1,0
Ago-19	6,5	0,7	7,5	0,7	9,7	0,9	10,8	1,0



Mes	MC1AV (%)	Valor	MC2AV (%)	Valor	MC3AV (%)	Valor	MC4AV (%)	Valor
Sep-19	6,8	0,7	8,7	0,8	10,9	1,0	12,7	2,0
Oct-19	7,8	0,7	10,4	1,0	12,9	2,0	15,4	2,5
Nov-19	10,3	1,0	14,1	2,5	17,3	2,7	20,1	3,2
Dic-19	12,5	2,0	17,0	2,7	20,4	3,2	22,7	3,5
Valor anual del índice		1,1		1,5		2,1		2,4
Clase de uso	CU2	2,2	CU3.1	3,0	CU3.2	4,1	CU3.2	4,7
Valor anual del Factor	0,7		0,6		1,4			
Valor global del índice		1,3		1,7		2,3		2,5
Clase de uso	CU2		CU3.1		CU3.2		CU3.2	
Valor global del Factor	0,8		0,7		1,4			
Efecto	Alero		V/Hz		Suelo			
Factor	0,8		0,7		1,4			

A continuación, se analizan los resultados obtenidos respecto a los tres aspectos estudiados en el presente trabajo: efecto del alero, de la distancia al suelo y de la posición relativa del elemento.

#### Efecto de los aleros

De los datos contenidos en la Tabla 27 se puede deducir que el efecto alero (MC2-MC1) es mayor en los meses de mayor precipitación, especialmente donde se registró la mayor intensidad de precipitación mensual. La Tabla 28 incluye un análisis del efecto aditivo de las diferentes variables climáticas sobre la predicción del efecto alero, revelando un efecto significativo tanto de la temperatura (TAV) como del número de días de lluvia intensa (N50).

Al comparar el efecto de las tres variables relacionadas con la intensidad de lluvia (N02, N10 y N50) se puede observar (Tabla 28) que el efecto aumenta a medida que aumenta la intensidad de la lluvia. Por lo tanto, se seleccionó la variable N50 como la más adecuada para fines predictivos.

Tomando estas variables, el modelo predictivo para los datos obtenidos es el siguiente:

$$MC2-MC1 = 1,96149 - 0,0567292 * TAV + 0,51102 * N50 \quad (R^2 = 0,736)$$

Se puede considerar que este modelo proporciona una estimación significativa del efecto de los aleros, ya que explica el 73,6% de la variabilidad observada.

De lo anterior, se puede concluir que el efecto de los aleros es mayor en situaciones donde hay un número elevado de días con lluvias de alta intensidad (entre 1,0 y 5,0 mm) y especialmente por encima de 5,0 mm, mientras que su efecto no resulta significativo cuando la pluviosidad es de baja intensidad, precipitaciones de entre 0,2 y 1,0 mm, ya que el coeficiente de determinación cae hasta valores de 0,047 (Tabla 28 para la variable N02).

Si se analiza el número de días con un contenido de humedad entre 12 y 18% (N12-N18 en Tabla 26), se puede observar que durante tres meses consecutivos del año este número es muy alto (20-31 días/mes), aunque en ningún caso este contenido de humedad supera el valor límite del 18% (N18 = 0).

De acuerdo con el sistema de puntuación propuesto basado en el contenido de humedad (Tabla 23), el valor del índice para el sensor MC1 durante los tres años de monitoreo se puede ver en la Tabla 29. El factor de efecto alero global se considera el valor anual más desfavorable, siendo en este caso 0,8.

Este valor de 0,8 se puede emplear como factor de reducción de riesgo del efecto alero ( $k_{s3}$  en la expresión [2] indicada en el apartado 4.4.1 de la introducción) con respecto a los elementos totalmente expuestos en posición vertical (MC2).

El resultado obtenido confirma, en términos de magnitud, la propuesta efectuada en las guías técnicas europeas publicadas (Thelandersson *et al.*, 2011; Jermer *et al.*, 2011 e Isaksson *et al.*, 2015), en las que se establece un valor de 0,7 para los elementos de madera colocados inmediatamente debajo del alero (a distancia de éste menor que la de la prolongación del alero, D) y de 0,85 para los elementos situados a una distancia del alero de entre D y 2,5D.

Dado que el número de días con un contenido de humedad superior al 18% (N18) es cero (Tabla 26 columna N18(MC1)), se estima que el riesgo de ataque de hongos o termitas en estas condiciones de diseño es inexistente. Sin embargo, como hay un número significativo de días con un contenido de humedad superior al 12% (N12), esta situación de diseño debe considerarse como perteneciente a la clase de uso 2 de la norma EN 335. La misma asignación se produce utilizando los valores anuales del índice y los criterios de asignación de la Tabla 24, lo cual confirma el sistema de puntuación propuesto en las Tablas 23 y 24.

#### Efecto de la distancia al suelo

Este aspecto del diseño se evaluó comparando las mediciones de los sensores MC3 y MC2. Como en el caso de la protección por aleros, en la Tabla 28 se incluye un análisis del efecto aditivo de las diferentes variables climáticas en la predicción del efecto de la distancia al suelo, revelando un efecto significativo tanto de la temperatura (TAV) como del número de días con lluvias intensas (N50).

El modelo predictivo resultante es el siguiente:

$$MC3-MC2 = 2,40276 - 0,0293868 * TAV + 0,314368 * N50 \quad (R^2 = 0,372)$$

Aunque este es el mejor modelo predictivo para los datos observados, no puede tomarse como válido, dado que el TAV y el N50 por sí solos solo explican el 37,2% de la variabilidad. Este bajo coeficiente de determinación es de esperar, ya que la diferencia entre MC3 y MC2 depende de más variables que las estrictamente climáticas, como el efecto de la humedad del suelo (no medido), que influye en el ascenso capilar del agua a través de los pilares.

Si se analiza el número de días con contenido de humedad entre 12% y 18% (N12-N18) para el sensor 3 en la Tabla 26, se puede observar que, para todos los meses del año, excepto aquellos con muy bajo número de días de lluvia, los valores son altos. En cuanto al número de días con contenido de humedad entre 18% y 22% (N18-N22), se puede observar que cuando el número de días en el mes con alta precipitación (N50) es alto, el valor sigue siendo relativamente elevado. Sin embargo, dado que el número de días con contenido de humedad superior al 25% (N25) es cero o muy bajo durante todo el año, se puede concluir que el riesgo de pudrición es moderado-alto. De acuerdo con los valores

anuales del índice, se debe usar una asignación de clase de uso de 3.2 de la norma EN 335 para la zona correspondiente al sensor 3.

De acuerdo con el sistema de puntuación propuesto, basado en el contenido de humedad (Tabla 23), el valor del índice para el MC3 durante el período de monitoreo de tres años es de 2,3 (Tabla 29). Los factores anuales para el efecto de la distancia al suelo se pueden calcular dividiendo el valor del índice anual para MC3 por el del MC2. El valor global del efecto de la distancia al suelo se considera el valor anual menos favorable, siendo en este caso 1,4.

Este último valor de 1,4 revela que la distancia al suelo o paredes húmedas es un factor importante y agravante a tener en cuenta para mitigar el riesgo de pudrición.

Por otra parte, este valor es muy inferior a la propuesta presente en las directrices técnicas europeas existentes (Thelandersson *et al.*, 2011; Jermer *et al.*, 2011 e Isaksson *et al.*, 2015), que establece un valor de 1,5 para distancias al suelo de 100-300 mm y de 2,0 para distancias <100 mm. En este trabajo, el valor de 1,4 se debe probablemente a que las precipitaciones, y como consecuencia la humedad del suelo, son mucho más bajas en Madrid que en el centro y norte de Europa donde se estableció el valor 2,0. Por ello, cabe destacar el gran efecto que tienen las condiciones climáticas sobre el valor de este factor y la necesidad de realizar investigaciones adicionales para modelizarlo en relación con el clima local. Sin embargo, cabe indicar el hecho de que el valor propuesto por las mencionadas guías técnicas europeas se refiere a pilares que no están en contacto directo con el suelo, situación diferente a la de este estudio.

Según los datos obtenidos, se puede utilizar un valor del factor de modificación del índice básico de distancia al suelo de 1,4 en el clima de Madrid, para la parte de los pilares en contacto con el suelo, al menos hasta 200 mm de distancia al terreno. Para la parte empotrada en el suelo o en paredes húmedas, debe aplicarse una asignación de clase de uso 4.

En cualquier caso, se debe mantener la recomendación de separar al menos 200 mm los elementos de madera del suelo, cimentaciones y muros húmedos. El uso de herrajes especiales que separan a los elementos verticales de las zapatas, en lo que hace referencia a pilares, y de ménsulas, cuando se trata de elementos horizontales, suele ser la mejor solución. También suele ser recomendable emplear productos de barrera dispuestos en las testas en el caso de que el elemento no esté empotrado y esta distancia de 200 mm no pueda ser asegurada. Si el contacto directo o el empotramiento en el suelo o los muros no es evitable, de acuerdo con lo visto, deberá adoptarse un factor agravante de la exposición de 1,4, al menos para toda la parte del elemento de madera cuya distancia a la fuente de humedad sea inferior o igual a 200 mm. En el caso de elementos de madera de una única pieza (p. ej. pilares y vigas) este factor agravante de 1,4 en muchas ocasiones define la asignación de clase de uso de todo el elemento.

#### Efecto de la posición relativa del elemento

Esta condición de diseño se analizó comparando las lecturas de los sensores MC4 y MC2. La Tabla 28 incluye un análisis del efecto aditivo de las diferentes variables climáticas sobre la predicción del efecto de la posición relativa del elemento, revelando un efecto significativo de la temperatura (TAV). La mejor predicción se obtiene usando TAV y N50 en la siguiente expresión:

$$MC4-MC2 = 6,26213 - 0,183079 * TAV + 0,487984 * N50 \quad (R^2 = 0,795)$$

La estimación aportada por este modelo se considera suficientemente precisa, ya que las dos variables independientes seleccionadas explican por sí solas el 79,5% de la variabilidad.

Partiendo de la Tabla 26 y analizando el número de días con contenido de humedad entre 12% y 18% (N12-N18), correspondiente al sensor MC4, se puede observar que, para todos los meses del año, con excepción de aquellos con un muy bajo número de días de lluvia (mayo a septiembre), los valores son elevados. También se puede observar que el número de días con contenido de humedad superior al 18% (N18), superior al 22% (N22) e incluso superior al 25% (N25) son significativamente elevados para los meses con altas precipitaciones (enero, febrero, marzo, abril y diciembre). El hecho de que el contenido de humedad en los meses de verano (julio, agosto y septiembre) descienda por debajo del 9% (Tabla 25), lo que lleva a un secado completo de los elementos de madera, explica que la degradación debida a hongos fuera indetectable cuatro años después de la instalación del dispositivo, aunque el riesgo no puede considerarse inexistente. De acuerdo con los valores anuales del índice y los criterios de asignación de la Tabla 23, se debe utilizar una asignación de clase de uso de 3.2.

De acuerdo con el sistema de puntuación propuesto basado en el valor del contenido de humedad (Tabla 23), el valor del índice para el sensor MC4 durante los tres años de monitoreo es de 2,5 (Tabla 29). Los valores anuales para el factor del efecto de posición relativa se pueden calcular dividiendo el valor del índice anual para MC2 por el de MC4. El factor global por efecto de la posición relativa (vertical vs. horizontal) se considera el valor anual menos favorable, siendo en este caso 0,7. Según esto, el riesgo de ataque de hongos en elementos colocados en posición vertical (en las condiciones climatológicas de Madrid) es un 30% menor que para los elementos colocados en posición horizontal. En cuanto a la asignación de clases de uso y teniendo en cuenta los criterios de asignación de la Tabla 24, la clase de uso correspondiente al sensor MC2 (posición vertical fuera de contacto con el suelo, ubicado a media altura del pilar) en Madrid es 3,1 y la correspondiente a la posición horizontal es 3.2.

Comparando este resultado con el de 0,9 propuesto por las directrices técnicas europeas existentes (Thelandersson *et al.*, 2011; Jermer *et al.*, 2011 e Isaksson *et al.*, 2015), para los elementos de madera colocados verticalmente fuera de contacto con el suelo y con suficiente ventilación en sus cuatro lados, el valor propuesto en este trabajo de 0,7 está justificado debido a que en Madrid se producen bastantes menos precipitaciones que en el norte de Europa, donde se basaron los estudios de las guías anteriores. Este resultado confirma que los factores de modificación de la exposición no pueden ser considerados independientes del macroclima y que, por ello, es necesario realizar más investigaciones para modelizar el valor de este factor en relación con el clima local.

#### **4.4.3.3. Principales conclusiones**

Según los datos obtenidos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- 1) Las variables que explican mejor la evolución anual del contenido de humedad en los diferentes puntos del dispositivo experimental son la temperatura del aire (TAV) y la precipitación por encima de 5,0 mm (N50).
- 2) Se ha verificado la existencia de un efecto real y significativo sobre el contenido de humedad de la madera como consecuencia de ciertas variables de diseño como protección por aleros, distancia al suelo y posición relativa de los elementos (vertical vs. horizontal).
- 3) El efecto protección por aleros se ha cuantificado mediante un factor de reducción ( $k_{si}$ ) de 0,8 con respecto a los elementos totalmente expuestos en posición vertical. El resultado obtenido coincide con el publicado en algunas guías técnicas europeas (Thelandersson *et al.*, 2011; Jermer *et al.*, 2011 e Isaksson *et al.*, 2015).
- 4) También se ha puesto de manifiesto el efecto de la distancia al suelo. Según los datos, se puede utilizar un factor agravante del índice básico de exposición en

función de la distancia al suelo de 1,4, aplicable para el clima de Madrid, de utilidad para la parte de los pilares en contacto con el suelo, pero distante de este hasta 200 mm. Para la parte empotrada en el suelo o en paredes húmedas, se debe aplicar de todos modos una asignación de clase de uso 4. Este valor de 1,4 es muy inferior al reflejado por la bibliografía (Thelandersson *et al.*, 2011; Jermer *et al.*, 2011 e Isaksson *et al.*, 2015) para elementos situados a una distancia <100 mm del suelo probablemente debido a las características del clima de Madrid (más seco y cálido). Serán necesarias más investigaciones para evaluar la variación de este factor con la distancia al suelo y con las características del clima local.

- 5) El posicionamiento horizontal de los elementos conduce inevitablemente a un mayor contenido de humedad que el de los elementos posicionados verticalmente. Considerando que el valor del índice de exposición básico ( $I_{so}$ ) se obtiene para un elemento colocado horizontalmente, se puede utilizar un factor de reducción ( $k_{si}$ ) de 0,7 para elementos colocados verticalmente. Esta diferencia en el comportamiento significa que la asignación de clases de uso en muchas ubicaciones geográficas puede variar para los elementos de madera de uso externo dependiendo de si están colocados vertical u horizontalmente.
- 6) Los factores de corrección obtenidos en este estudio difieren en cierta medida de los de la bibliografía (Thelandersson *et al.*, 2011; Jermer *et al.*, 2011 e Isaksson *et al.*, 2015), que se obtuvieron en localizaciones geográficas con climas muy diferentes al de Madrid. Este resultado confirma que los factores de modificación de la exposición no pueden ser considerados independientes del macroclima y que, por ello, es necesario realizar más investigaciones para modelizar el valor de estos factores en relación con el clima local.
- 7) En estudios futuros sería recomendable monitorear el contenido de humedad de los pilares de madera a distancias de 10 mm, 100 mm, 200 mm y 300 mm del suelo para determinar el efecto real de la separación del terreno, no solo en los elementos de contacto directo con el suelo sino también en los separados de este por efecto de sobreelevación respecto del terreno o empleo de barreras resistentes a la capilaridad.
- 8) Análogamente, en el futuro debería ser analizado el efecto de las diversas soluciones de unión posibles entre elementos de diferente orientación, como medio de valorar su influencia en la evolución del contenido de humedad de los elementos de madera con ellas unidos.

#### 4.4.4. Contribución del candidato

Durante la ejecución del proyecto BIA2013-42434-R, de *Evaluación del comportamiento funcional de la madera maciza en condiciones de uso exterior sin contacto con el suelo*, donde se han generado los datos necesarios para el análisis del efecto relativo de ciertas variables del diseño en la agravación o reducción del riesgo de pudrición de la madera, la doctoranda se responsabiliza del montaje, instalación y seguimiento del dispositivo experimental específicamente diseñado y construido en el campus de Puerta de Hierro I del INIA, en Madrid. Junto a los directores de la Tesis y restantes miembros del equipo investigador del proyecto, interviene en la conceptualización, redacción y revisión del artículo [1] del apartado 4.4.5.1.

Respecto a la contribución del apartado 4.4.5.2, Herramienta informática para la asignación paramétrica de las clases de uso de la norma EN 335, la doctoranda se responsabiliza del análisis de las experiencias procedentes de los proyectistas, de su implementación en la herramienta y de la corrección de ésta en función de los resultados obtenidos. Junto con sus directores de Tesis la doctoranda también participó en la concepción y revisión de la citada herramienta.

#### 4.4.5. Artículos y contribuciones efectuadas

##### 4.4.5.1. Artículos científicos referenciados (en negrita la candidata, subrayados los directores)

1. **Conde García, M.**, Conde García, M., Tenorio, J.A., Fernández-Golfín, J.I., 2021b. Experimental evaluation of the effect of different design conditions on the risk of decay in solid wood exposed to outdoor climate. Mater Construcc., 71 (341), e247. ISSN: 0465-2746. 2021 Impact Factor: 0,623 59/196-Q2 (SJR) Cat: Building and construction. <https://doi.org/10.3989/mc.2021.12220>

##### 4.4.5.2. Otras actividades

1. Fernández-Golfín, J.I., **Conde García, M.**, Conde García, M., 2017. Herramienta EXCEL para la asignación paramétrica de las clases de uso de la norma EN 335:2013.



## 5. CONTRIBUCIÓN DEL CANDIDATO

---

La investigación sobre la mejora del comportamiento a largo plazo de las soluciones constructivas con madera se inicia con la participación del Laboratorio de Física de la Madera del ICIFOR-INIA-CSIC en el seno de la acción COST FP1303 - *Performance of bio-based building materials* (2013 y 2017). En esta acción COST se empezó trabajando sobre la puesta en marcha de un sistema paramétrico para la evaluación del tiempo en servicio de la madera y el efecto que en él tenían algunas variables inherentes al material, clima circundante y diseño constructivo.

Para obtener los datos nacionales que permitieran validar las decisiones que se estaban tomando en el seno de la acción COST mencionada y, sobre todo, para evaluar el efecto de los climas nacionales, se puso en marcha el proyecto del Plan Estatal BIA2013-42434-R *Evaluación del comportamiento funcional de la madera maciza en condiciones de uso exterior sin contacto con el suelo* (2014-2017), del que la candidata formó parte.

La primera actividad que se realizó en este proyecto fue diseñar e instalar siete dispositivos experimentales para evaluar en diferentes localidades, representativas todas ellas de situaciones climáticas distintas propias de la geografía peninsular, el efecto del clima meteorológico en el clima del material, así como la influencia que el factor especie podría tener tanto en la dinámica del clima del material como en la durabilidad de las maderas expuestas. Para ello, se expusieron distintos tipos de maderas (tres pinos sin tratar, madera termotratada de pino, madera de castaño y eucalipto y madera de abeto como referencia de especie europea). Estos dispositivos fueron instalados a lo largo del año 2015.

Con los datos de evolución de clima de material obtenido en los primeros tres años completos (2016, 2017 y 2018) se publicó el siguiente artículo:

- **Conde García, M.**, Conde García, M., Fernández-Golfín, J.I., 2021a. Species effect on decay resistance of wood exposed to exterior conditions above the ground in Spain. *Materiales de Construcción*, 71 (341), e236. ISSN: 0465-2746. 2021 Impact Factor: 0,623 59/196-Q2 (SJR) Cat: Building and construction. <https://doi.org/10.3989/mc.2021.11320>

Durante el periodo que comprende el estudio anterior, 2016-2018, no se produjo pudrición en ninguna de las estaciones analizadas, motivo por lo cual no fue posible proponer modelos propios de estimación de la vida en servicio ni evaluar los modelos propuestos por algunos grupos noreuropeos. Las pudriciones empezaron a aparecer únicamente en la estación de Llames (Asturias) a lo largo del año 2020. Por dicho motivo el desarrollo de modelos propios y la evaluación de los modelos existentes queda pendiente para futuros trabajos.

Paralelamente al diseño e instalación de los dispositivos experimentales y como una actividad incluida en el proyecto BIA2013-42434-R anteriormente citado, se continuó con los trabajos de optimización del sistema de medición de la humedad de la madera por métodos eléctricos de naturaleza continua, que comenzaron con el proyecto RTA2008-00005-00-00 *Determinación de las curvas resistencia eléctrica-humedad para diversas maderas y el corcho* (2008-2012). Dicho proyecto dejó pendiente la obtención de las curvas de calibración para los pinos nacionales, las cuales resultaban de absoluta necesidad para la correcta ejecución de las medidas de evolución del clima del material expuesto en los dispositivos experimentales del proyecto BIA2013-42434-R.

Este trabajo de optimización de las curvas de calibración de equipos de medición de la humedad de la madera por métodos de resistencia eléctrica dio como resultado la publicación de los siguientes artículos científicos:



- Fernández-Golfín, J.I., **Conde García, M.**, Conde García, M., Fernandez-Golfín, J.J., Calvo, R., Baonza, M.V., de Palacios, P., 2012. Curves for the estimation of the moisture content of ten hardwoods by means of electrical resistance measurements. *Forest Systems*, 21(1), 121-127. ISSN: 2171-5068. 2012 IF: 0,342. 57/165-Q2 (SJR) Cat: Forestry. <https://doi.org/10.5424/fs/2112211-11429>
- Fernández-Golfín, J.I., **Conde García, M.**, Fernández-Golfín, J.J., Conde, M., Hermoso, E., Cabrero, J.C., 2014. Effect of temperature of thermotreatment on electrical conductivity of radiata pine timber. *Maderas Ciencia y Tecnología*, 16 (1), 25-36. ISSN: 0717-3644. 2014 IF: 0,722. 10/22-Q2 (JCR) Cat: Materials Science, paper&Wood. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2014005000003>
- **Conde García, M.**, Conde García, M., Fernández-Golfín, J.I., 2021c. Improving the accuracy of wood moisture content estimation in four European softwoods from Spain. *Forest Systems*, 30(1), e002. ISSN 2171-9845. 2021 IF: 0,322 74/168-Q2 (SJR) Cat: Forestry. <http://dx.doi.org/10.5424//fs/2021301-17798>

Este trabajo se considera completado y, por tanto, no existen tareas pendientes.

Con los datos que se fueron generando en los dispositivos experimentales del proyecto BIA2013-42434-R durante los años 2015 y 2016, se pudo observar que el efecto del contenido de humedad y temperatura de la madera en la cinética de la degradación de la madera era diferente en los climas españoles y en los europeos (centro y norte). Mientras que en los climas nacionales la variable decisiva para el desarrollo de los hongos es el contenido de humedad, en los europeos es la temperatura. Por dicho motivo se decidió trabajar en una línea distinta a la europea, utilizando la aproximación norteamericana basada en el empleo del índice Scheffer. Este índice climático, basado en el efecto de la temperatura y los días de lluvia, es capaz de estimar el riesgo de pudrición de la madera en una estación concreta (Scheffer, 1971). Por ello se trabajó en el desarrollo de un mapa nacional de distribución del índice Scheffer con los datos procedentes de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, 2010), así como en la mejora de dicho índice considerando el efecto de las condensaciones. Se consideró necesario incluir este efecto porque en ciertas estaciones el número de días con presencia de nieblas y rocío es muy elevado y ambas situaciones generan humedecimiento de la madera. Fruto de este trabajo se publicó el siguiente artículo:

- Fernandez-Golfín, J.I., Larrumbide, E., Ruano, A., Galvan, J., **Conde, M.**, 2016. Wood decay hazard in Spain using the Scheffer index: proposal for an improvement. *Eur. J. Wood Prod.*, 74 (4), 591-599. ISSN: 0018-3768. 2014 IF: 1,082 10/22-Q2 (JCR) Cat: Materials Science, paper&Wood. <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1036-z>

Los resultados de este trabajo permitieron establecer los índices máximos de riesgo por zonas, ya que se basaron en el empleo de la precipitación total diaria que impacta sobre un elemento dispuesto horizontalmente. Sin embargo, el trabajo no explica los casos de elementos de madera dispuestos verticalmente, fundamentalmente fachadas, carpinterías y pilares. En estos casos, el efecto de la lluvia batiente, que por efecto del viento impacta directamente sobre los elementos de madera, establece un nivel de riesgo distinto y menor que para los elementos dispuestos horizontalmente. El análisis del efecto de la lluvia batiente sobre elementos dispuestos verticalmente no está incluido en la presente Tesis, aunque está en proceso de estudio por parte de la candidata.

Durante la ejecución del proyecto BIA2013-42434-R, antes citado, también quedó patente la necesidad de analizar si los factores de diseño, agravantes o minoradores del riesgo, considerados a nivel centro y noreuropeo, eran de aplicación para los climas nacionales.

Para conseguir avanzar en este aspecto se diseñó e instaló un dispositivo experimental para analizar el efecto de los aleros, la separación del suelo, la disposición espacial (vertical y horizontal) y las uniones en el clima de material, evaluándolo durante los años 2017, 2018 y 2019. Este trabajo dio lugar al siguiente artículo:

- **Conde García M.**, Conde García M., Tenorio Ríos J.A., Fernández-Golfín J.I., 2021b. Experimental evaluation of the effect of different design conditions on the risk of decay in solid wood exposed to outdoor climate. *Mater Construcc.*, 71 (341), e247. ISSN: 0465-2746. 2021 Impact Factor: 0,623 59/196-Q2 (SJR) Cat: Building and construction. <https://doi.org/10.3989/mc.2021.12220>

Este trabajo permitió caracterizar el efecto de estas cuatro variables de diseño en la mayoración/minoración del ritmo de la degradación. Sin embargo, queda como tarea pendiente la evaluación del diseño en otros climas nacionales distintos del propio de la meseta Sur, donde se ubica la estación de Madrid en la que se llevó a cabo el estudio.



# 6. CONCLUSIONES

---

## 6.1. Conclusiones Generales

Como complemento a las conclusiones parciales de cada trabajo de investigación, incluidas en los apartados 4.1 a 4.4 de esta Tesis, se exponen las siguientes conclusiones generales:

1. Los modelos de dosis-respuesta han demostrado ser una buena herramienta para el cálculo tanto del índice básico de exposición como de la dosis crítica (la que da lugar a la aparición de los primeros síntomas de pudrición), aunque deberían validarse con los resultados procedentes, de los experimentos basados en campos de ensayo (incluidos el español) repartidos por toda la geografía europea y aún sin finalizar, siguiendo la metodología común de Thelandersson *et al.* (2011).
2. Hasta que los modelos dosis-respuesta que figuran en la bibliografía científica internacional no queden plenamente confirmados con los resultados experimentales, la aproximación española de asignación de las clases de uso en función de los valores del índice Scheffer ha demostrado ser de gran utilidad para los prescriptores.
3. El índice Scheffer resulta una herramienta eficaz y sencilla en su aplicación para la determinación de los índices zonales relativos, que son los que permiten determinar la dosis básica de la estación en estudio a partir de la dosis básica de la estación de referencia.
4. La dosis crítica de pudrición ( $D_{crit}$ ), necesaria para la aplicación práctica del sistema paramétrico de cálculo de la superación de los límites de servicio en lo que a la durabilidad se refiere, debe ser determinada experimentalmente en condiciones cercanas a las de uso sobre la base de modelos de dosis-respuesta experimentalmente validados.
5. Los parámetros modificadores de la dosis crítica ( $k_{wa}$  y  $k_{inh}$ ) por efecto de las propiedades del material (especie y tratamiento) que se emplean para el cálculo del límite de servicio de la resistencia biológica del material, deben ser determinados para la madera tratada con diferentes productos, tanto en volumen como en barrera, así como para la madera termotratada por los diferentes sistemas existentes en el mercado.

## 6.2. Trabajos futuros

Fruto de esta Tesis y como complemento a los trabajos realizados, surgen posibles trabajos futuros:

1. Mantenimiento de la instalación y la monitorización de los dispositivos experimentales existentes, ampliándolo en la medida de lo posible, para generar series temporales largas de evolución del clima del material, que permitan analizar la validez de los actuales y futuros modelos dosis-respuesta, así como el efecto de la especie y/o el tratamiento en todas las condiciones climáticas existentes a lo largo de la geografía nacional y europea.
2. Aunque algunos de los valores de los factores correctores del índice básico de exposición ( $I_{so}$ ) utilizados en las guías constructivas (Thelandersson *et al.*, 2011; Isaksson *et al.*, 2015; Jermer *et al.*, 2011; Fernández-Golfín *et al.*, 2018) han sido confirmados experimentalmente (Conde *et al.*, 2021c), todavía se necesita efectuar investigación adicional sobre el efecto de algunos factores inherentes al diseño constructivo en los distintos climas nacionales.
3. Cuantificación del efecto de los vientos dominantes de lluvia en diferentes condiciones climáticas nacionales y europeas, sobre la base del empleo del índice de lluvia batiente propuesto por la norma ISO 15927-3.



## 7. BIBLIOGRAFÍA

---

- Adan, O.C.G., 1994. On the fungal defacement of interior finishes. Eindhoven University of Technology. Thesis. Eindhoven. pp 83 – 185.  
<https://research.tue.nl/files/3467062/427806.pdf>
- Agencia Estatal de Meteorología - AEMET, 2010. Resúmenes climatológicos de España.  
[http://www.aemet.es/es/conocerlas/recursos\\_en\\_linea/publicaciones\\_y\\_estudios/publicaciones/detalles/guia\\_resumida\\_2010](http://www.aemet.es/es/conocerlas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/detalles/guia_resumida_2010)
- Akita, H., Kitahara, H., Ono, H., 2014. Effect of climate and structure on the progression of wooden check dam decay. *Journal of Forest Research*, 19:5, 450-460.  
<https://doi.org/10.1007/s10310-013-0434-x>
- Arnold, U., 2009. Untersuchung zum kritischen Feuchte-Temperatur-Verhältnis für Pilzbefall an Holzbalkenköpfen. Master thesis, HAWK-Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst, Fakultät Bauwesen, Hildesheim.
- AS 1720.1-1988 Timber structures, Part 1: Design methods. Standards Australia.
- Avramidis, S., 1989. Evaluation of “three-variable” models for the prediction of equilibrium moisture content in wood. *Wood Sci. Technol.* 23, 251-258.  
<https://doi.org/10.1007/BF00367738>
- Ayerst, G., 1969. The effects of moisture and temperature on growth and spore germination in some fungi. *J. Stored Prod. Res.* 5, 127-141. [https://doi.org/10.1016/0022-474X\(69\)90055-1](https://doi.org/10.1016/0022-474X(69)90055-1)
- Bengtsson, C., 2001. Variation of moisture induced movements in Norway spruce (*Picea abies*). *Ann. For. Sci.* 58, 569–581 <https://doi.org/10.1051/forest:2001146>
- Block, S.S., 1953. Humidity Requirements for Mold Growth. *Applied Microbiology* 1(6), 287–293.
- Bornemann, T., Brischke, C., Lück, J.M., 2012. Comparative studies on the moisture performance and durability of wooden facades. Proceedings IRG annual meeting 2012. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, IRG/WP 12-20492.
- Brischke, C., Rapp, A.O., Bayerbach, R., 2007. Decay influencing factors: a basis for service life prediction of wood and wood-based products. *Wood Mat Sci Eng* 1, 91–107.  
<https://doi.org/10.1080/17480270601019658>
- Brischke, C., 2007. Investigation of decay influencing factors for service life prediction of exposed wooden components. Doctoral thesis, University of Hamburg, Hamburg.  
<https://ediss.sub.uni-hamburg.de/handle/ediss/1945>
- Brischke, C., Rapp, A.O., Bayerbach, R., Morsing, N., Fynholm, P., Welzbacher, C.R., 2008. Monitoring the “material climate” of wood to predict the potential for decay: results from in-situ measurements on buildings. *Building and Environment* 43 (2008), 1575–1582. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.10.001>
- Brischke, C., Rapp, A.O., Bayerbach, R., 2008b. Measurement system for long-term recording of wood moisture content with internal conductively glued electrodes. *Building and Environment* 43, 1566–1574.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.10.002>
- Brischke, C., Rapp, A.O., 2008. Dose–response relationships between wood moisture content, wood temperature and fungal decay determined for 23 European field test sites. *Wood Sci Technol* 42, 507-518.  
<https://doi.org/10.1007/s00226-008-0191-8>

- Brischke, C., Rapp, A.O., 2008b. Influence of wood moisture content and wood temperature on fungal decay in the field: Observations in different micro-climates. *Wood Sci Technol* 42(8), 663-677. <https://doi.org/10.1007/s00226-008-0190-9>
- Brischke, C., Rapp, A.O., 2010a. Service life prediction of wooden components – Part 1: Determination of dose response functions for above ground decay. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, IRG/WP10-20439.
- Brischke, C., Lauenstein, B., Bilstein, M., Bornemann, T., Rapp, A.O., 2010b. Service life prediction of wooden components – Part 2: Impact of material, exposure and design details. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, IRG/WP10-20440.
- Brischke, C., Rapp, A.O., Hasan, M., Despot, R., 2010c. Impact of climate change on wood deterioration - Challenges and solutions for cultural heritage and modern structures. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, IRG/WP10-20441.
- Brischke, S., Frühwald Hansson, E., Kawurmaci, D., Thelandersson, S., 2011. Decay hazard mapping for Europe. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, IRG/WP 11-20463
- Brischke, C., Meyer, L., Bornemann, T., 2013. The potential of moisture content measurements for testing the durability of timber products. *Wood Science and Technology*, 47(4), 869–886. <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0548-5>
- Brischke, C., Hesse, C., Meyer, L., Bardage, S.; Jermer, J., Isaksson, T., 2014. Moisture dynamics of wood– An approach to implement the wetting ability of wood into a resistance classification concept. Proceedings IRG annual meeting 2014. IRG/WP 14-20557. IRG; Stockholm.
- Brischke, C., Lampen, S., 2014. Resistance based moisture content measurements on native, modified and preservative treated wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 72, 289–292. <https://doi.org/10.1007/s00107-013-0775-3>
- Brischke, C., Meyer-Veltrup, L., 2016. Modelling timber decay caused by brown rot fungi. *Materials and Structures*, 49(8): 3281-3291. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0719-y>
- Brischke, C., Soetbeer, A., Meyer-Veltrup, L., 2017. The minimum moisture threshold for wood decay by basidiomycetes revisited. A review and modified pile experiments with Norway spruce and European beech decayed by *Coniophora puteana* and *Trametes versicolor*. *Holzforschung* 71 [11], 893–903. <https://doi.org/10.1515/hf-2017-0051>
- Brischke, C., Stricker, S., Meyer-Veltrup, L., Emmerich, L., 2018. Changes in sorption and electrical properties of wood caused by fungal decay. *Holzforschung*. 73(5), 445–455. <https://doi.org/10.1515/hf-2018-0171>
- Brischke, C., Selter, V., 2020. Mapping the decay hazard of wooden structures in topographically divergent regions. *Forests* 11(5), 510. <https://doi.org/10.3390/f11050510>
- Carll, C.G., 2009. Decay hazard Scheffer Index values calculated from 1971-2000 climate normal data. General Technical report FPL-GTR-179. USDA Forest Service, Forest Prod Lab. [https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl\\_gtr179.pdf](https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr179.pdf)
- Cavalli, A., Togni, M., 2015. Monitoring of historical timber structures: state of the art and prospective. *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 5: 107-113. <https://doi.org/10.1007/s13349-014-0081-8>

- Coggins, C.R., 2008. Trends in timber preservation—a global perspective. *Journal of Tropical Forest Science* 20(4): 264–272.  
<https://www.frim.gov.my/v1/jtfsonline/jtfs/v20n4/264-272.pdf>
- Conde García, M., Conde García, M., Fernández-Golfín, J.I., 2021a. Species effect on decay resistance of wood exposed to exterior conditions above the ground in Spain. *Materiales de Construcción*, 71 (341), e236.  
<https://doi.org/10.3989/mc.2021.11320>
- Conde García, M., Conde García, M., Fernández-Golfín, J.I., 2021b. Experimental evaluation of the effect of different design conditions on the risk of decay in solid wood exposed to outdoor climate. *Mater Construcc.*, 71 (341), e247.  
<https://doi.org/10.3989/mc.2021.12220>
- Conde García, M., Conde García, M., Fernández-Golfín, J.I., 2021c. Improving the accuracy of wood moisture content estimation in four European softwoods from Spain. *Forest Systems*, 30(1), e002. <http://dx.doi.org/10.5424//fs/2021301-17798>
- Cornick, S., Dalgliesh, W. A., 2003. A moisture index to characterize climates for building envelope design. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 27(2), 151–178. <https://doi.org/10.1177/109719603036210>
- Dietsch, P., Franke, S., Franke, B., Gamper, A., Winter, S., 2015a. Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts. *J Civil Struct. Health Monit.* 5, 115–127. <https://doi.org/10.1007/s13349-014-0082-7>
- Dietsch, P., Gamper, A., Merk, M., Winter, S., 2015b. Monitoring building climate and timber moisture gradient in large-span timber structures. *J Civil Struct. Health Monit.* 5, 153-165. <https://doi.org/10.1007/s13349-014-0083-6>
- Dyken, T., Keep, H., 2010. Monitoring the Moisture Content of Timber Bridges. International Conference on Timber Bridges (ITCB 2010). Lillehammer, Norway 12-15 September 2010.
- Elowson, T., Bergström, M., Hämäläinen, M., 2003. Moisture dynamics in Norway spruce and Scots pine during nine years of outdoor exposure above ground in relation to different surface treatments and handling conditions. *Holzforschung* 57, 219-227.  
<https://doi.org/10.1515/HF.2003.032>
- Emmerich, L., Brischke, C., Sievert, M., Schulz, M.S., Jaeger, A.-C., Beulshausen, A., Humar, M., 2020. Predicting the Outdoor Moisture Performance of Wood Based on Laboratory Indicators. *Forests*. 11(9), 1001. <https://doi.org/10.3390/f11091001>
- EN 252:2015 Field test method for determining the relative protective effectiveness of a wood preservative in ground contact. European Committee for Standardization (CEN).
- EN 330:2015 Wood preservatives - Determination of the relative protective effectiveness of a wood preservative for use under a coating and exposed out-of-ground contact - Field test: L-joint method.
- EN 335:2013 Durability of wood and wood-based products - Use classes: definitions, application to solid wood and wood-based products. European Committee for Standardization (CEN).
- EN 350-1:1995 Durability of wood and wood-based products - Natural durability of solid wood - Part 1: Guide to the principles of testing and classification of the natural durability of wood. European Committee for Standardization (CEN).
- EN 350-2:1995 Durability of wood and wood-based products - Natural durability of solid wood - Part 2: Guide to natural durability and treatability of selected wood species of importance in Europe. European Committee for Standardization (CEN).



- EN 1995-1-1:2016 Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. European Committee for Standardization (CEN).
- EN 13183-1:2002 Moisture content of a piece of sawn timber - Part 1: Determination by oven dry method. European Committee for Standardization (CEN).
- EN 13183-2:2002 Moisture content of a piece of sawn timber. Part 2: Estimation by electrical resistance method. European Committee for Standardization (CEN).
- EN 14081-1:2016+A1:2020 Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 1: General requirements. European Committee for Standardization (CEN).
- ENV 1995-1-1: 1993 Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. European Committee for Standardization (CEN).
- Fernández-Golfín, J.I., Conde García, M., 2007. Manual técnico de secado de maderas. 2019 p. ISBN 978-84-87381-37-9. Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y el Corcho.  
<https://infomadera.net/modulos/publicaciones.php?id=6&claseact=publicaciones>
- Fernández-Golfín, J.I., Conde García, M., Conde García, M., Fernández-Golfín, J.J., Calvo, R., Baonza, M.V., de Palacios, P., 2012. Curves for the estimation of the moisture content of ten hardwoods by means of electrical resistance measurements. *Forest Systems*, 21(1), 121-127. <https://doi.org/10.5424/fs/2112211-11429>
- Fernández-Golfín, J.I., Conde García, M., Fernández-Golfín, J.J., Conde García, M., Hermoso, E., Cabrero, J.C., 2014. Effect of temperature of thermotreatment on electrical conductivity of radiata pine timber. *Maderas Ciencia y Tecnología*, 16 (1), 25-36. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2014005000003>
- Fernández-Golfín, J.I., Troya, M.T., 2014. Hacia un nuevo paradigma del concepto de durabilidad de la madera y productos derivados *Boletín AITIM*. 2014 (289):40-43. Internet en: <www.aitim.es>. ISSN 0044-9261.
- Fernández-Golfín, J.I., Larrumbide, E., Ruano, A., Galván, J., Conde, M., 2016. Wood decay hazard in Spain using the Scheffer index: proposal for an improvement. *Eur. J. Wood Prod.*, 74 (4), 591-599. <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1036-z>
- Fernández-Golfín, J.I., Galván, J., Conde, M., Conde, M., 2016b. Effect of sawing pattern and species on the permeability to water of two conifers: radiata and Scots pine. *Comunicación en COST ACTION F9 1303 Workshop "Designing with bio-based building materials: Challenges and opportunities"*. Madrid, 24 y 25 de febrero de 2016.
- Fernández-Golfín, J.I., Peraza, F., Touza, M., Arriaga, F., 2018. Guía para la asignación de clases de uso y de servicio a los productos de la madera. Monografía INIA Serie Forestal nº 30. España. Madrid. 95 pp. ISBN: 978-84-7498-582-5.
- Foliente, G.C., Leicester, R.H., Cole, I., Mackenzie, C., 1999. Development of a reliability-based durability design method for timber construction- Timber Durability Design Development. In *In Proceedings of 8th International Conference on Durability of Building Materials and Components*, 30 May–3 June, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada, 1083-1103.  
<https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB2059.pdf>
- Forsén, H., Tarvainen, V., 2000. Accuracy and functionality of hand-held wood moisture content meters. *VTT publications* nº 420. 95 pp. Finland. ISBN 951-38-5581-3.
- Fortino, S., Genoese, A., Genoese, A., Nunes, L., Palma, P., 2013. Numerical modelling of the hygro-thermal response of timber bridges during their service life: a monitoring case-study. *Construction and Building Materials* 47, 1225-1234.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.009>

- Franke, B, Franke, S., Müller, A., 2015. Case studies: long-term monitoring of timber bridges. *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 5, 195-202. <https://doi.org/10.1007/s13349-014-0093-4>
- Fredriksson, M., 2010. Methods for determination of moisture conditions in wood exposed to high moisture levels. Licentiate thesis. Lund University, Division of building materials. Doc TVBM-3157. <https://www.semanticscholar.org/paper/Methods-for-determination-of-moisture-conditions-in-Fredriksson/e5d0d5e88612413bd0028f119a2d4d56cf0f6228>
- Frohnsdorff, G., Masters, L.W., 1980. The meaning of durability prediction, In *Durability of building materials and components*. Proceedings of the first international conference. ASTM STP 691 pp. 17-30. ASTM, Philadelphia, PA.
- Frühwald, E., Brischke, C., Meyer, L., Isaksson, T., Thelandersson, S., & Kavurmaci, D., 2012. Durability of timber outdoor structures - modelling performance and climate impacts. In P. Quenneville (Ed.), *WCTE World Conference on timber engineering 2012* (pp. 295-303). New Zealand Timber Design Society.
- Grant, C., Hunter, C.A., Flannigan, B.A., & Bravery, A.F., 1989. The moisture requirements of moulds isolated from domestic dwellings. *Internat. Biodet.* 25, 259-284.
- De Groot, R.C., 1992. Test assemblies for monitoring decay in wood exposed above ground. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 29(2), 151-175. [https://doi.org/10.1016/0964-8305\(92\)90014-F](https://doi.org/10.1016/0964-8305(92)90014-F)
- Hasegawa, M., 1996. Relationships between wood protection and climate indexes. *Mokuzai Hozon*, 22(5): 2-9.
- Hasan, M., Despot, R., Trajković, J., Rapp, A.O., Brischke, C., Welzbacher, C.R., 2013. The Echo (Jeka) Pavilion in Forest-Park Maksimir Zagreb - Reconstruction and Health Monitoring. *Advanced Materials Research* 778, 765-770. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.778.765>
- Hedley, M. E., Durbin, G., Wichmann-Hansen, L., Knowles, L., 2004. Comparative moisture uptake of Douglas fir and radiata pine structural lumber when exposed to rain wetting as an indicator of relative decay resistance. *International Research Group on Wood Protection*, Stockholm, IRG/WP04-20285.
- Huckfeldt, T., Schmidt, O., 2006. *Hausfäule- und Bauholzpilze. Diagnose und Sanierung*. Rudolf Müller, Köln. 377 pp. ISBN 978-3-481-03100-8 (2<sup>a</sup> edición, 2015).
- Humar, M.; Kržišnik, D.; Lesar, B., Brischke, C., 2019. The performance of wood decking after five years of exposure: verification of the combined effect of wetting ability and durability. *Forests*, 10 (10): 903-920. <https://doi.org/10.3390/f10100903>
- Hukka, A., Viitanen, H., 1999. A mathematical model of mould growth on wooden material. *Wood Sci Technol* 33:475-485. <https://doi.org/10.1007/s002260050131>
- Imken, A.A., Brischke, C., Kögel, S., Krause, K.C., Mai, C., 2020. Resistance of different wood-based materials against mould fungi: a comparison of methods. *Eur. J. Wood Prod.* 78, 661-671. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01554-5>
- Isaksson, T., Thelandersson, S.; Ekstrand-Tobin, E.; Johansson, P., 2010. Critical conditions for onset of mould growth under varying climate conditions, *Building and Environment* 45(7), 1712-1721. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.01.023>
- Isaksson T., Brischke, C., Thelandersson, S., 2013. Development of decay performance models for outdoor timber structures. *Materials and Structures* 46, 1209-1225. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9965-4>

- Isaksson, T., Thelandersson, S., 2013b. Experimental investigation on the effect of detail design on wood moisture content in outdoor above ground applications. *Build. Environ.* 59, 239-249. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.08.023>
- Isaksson, T., Thelandersson, S., Jermer, J.; Brischke, C., 2015. Service life of wood in outdoor above ground applications: Engineering design guideline. Background document Rapport TVBK-3067. Lund University; Division of Structural Engineering; Lund; Sweden. ISBN 978-87993-02-2
- ISO 13788:2016. Hygrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation methods. International Organization for Standardization (ISO), Geneva
- ISO 13823:2008. General principles on the design of structures for durability. International Organization for Standardization (ISO), Geneva
- ISO 15686-1:2011. Buildings and constructed assets—service life planning—part 1: general principles and framework. International Organization for Standardization (ISO), Geneva
- ISO 15927-3:2009. Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data – Part 3: Calculation of a driving rain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data. International Organization for Standardization (ISO), Geneva
- ISO 21887:2007. Durability of wood and wood-based products – Use classes. International Organization for Standardization (ISO), Geneva
- ISO 4469:1981. Wood – Determination of radial and tangential shrinkage. International Organization for Standardization. International Organization for Standardization (ISO), Geneva
- ISO 4628-4:2004. Paints and varnishes - Evaluation of degradation of coatings - Designation of quantity and size of defects; and of intensity of uniform changes in appearance - Part 4: Assessment of degree of cracking. International Organization for Standardization (ISO), Geneva
- Jermer, J. (editor), Thelandersson, S., Viitanen, H., Toratti, T., Gröll, G., Steitz, A., Michael, T., Bader, T., Alfredsen, G., Suttie, E., de Windt, I., Van Acker, J., Bollmus, S., Podgorski, L., 2011. WoodExter-Service life and performance of exterior wood above ground-Final Report. SP Report 2011: 53pp. SP Technical Research Institute of Sweden. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:962639/FULLTEXT01.pdf>
- Johansson, P., Bok, G., Ekstrand-Tobin, A., 2013. The effect of cyclic moisture and temperature on mould growth on wood compared to steady state conditions. *Build. Environ.* 65, 178-184. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.004>
- Kim, T.G., Ra, J.B., Kang, S.M., Wang, J., 2011. Determination of decay hazard index (Scheffer index) in Korea for exterior above-ground wood. *J. Kor. Wood Sci. Technol.* 2011, 39, 531–537. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2011.39.6.531>
- Kim, T., Ra, J.B., 2013. Decay Hazard (Scheffer) Index Values in Korea for Exterior Aboveground Wood *Forest Products Journal* 63 (3-4), 91–94. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-13-00033>
- Kim, T., Ra, J.B., 2014. Change of decay hazard index (Scheffer index) for exterior above-ground wood in Korea. *J. Kor. Wood Sci. Technol.* 42, 732–739. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2014.42.6.732>

- Kržišnik, D., Lesar, B., Thaler, N., Planinsic, J., Humar, M., 2020. A study on the moisture performance of wood determined in laboratory and field trials. *Eur. J. Wood Prod.* 78, 219–235. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01506-z>
- Kutnik, M., Suttie, E.; Brischke, C., 2014. European standards on durability and performance of wood and wood-based products – Trends and challenges, *Wood mater Sci. Eng.*, 9:3, 122-133. <https://doi.org/10.1080/17480272.2014.894574>
- Lanata, F., 2015. Monitoring the long-term behaviour of timber structures. *J Civil Struct Health Monit* 5, 167–182. <https://doi.org/10.1007/s13349-014-0095-2>
- Larkin, G.M., Laks, P.E., 2008. To decay or not to decay: An accelerated field test of the validity of the Scheffer index. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, IRG/WP 08-20392.
- Lebow, P. K., Carll, C.G., 2010. Investigation of Shift in Decay Hazard (Scheffer) Index Values over the Period 1969-2008 in the Conterminous United States. In Proceedings 106 Annual Meeting of the American Wood Protection Association. Vol. 106 Hyatt Regency Riverfront Savannah, Georgia May 23-25, 2010.
- Leicester, R.H., Barnacle, J.E., 1990. Durability - A structural approach. Proceedings of 23rd Forest Products Research Conference, 19-22 November CSIRO Forestry and Forest Products, Clayton, Australia, Vol. 1, Paper 2/4, 9p.
- Leicester, R.H., Foliente, G.C., 1999. Models for timber decay and termite attack. In Proceedings of 8th International Conference on Durability of Building Materials and Components, 30 May–3 June, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada, 10p. <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB1808.pdf>
- Leicester, R.H., Wang, C.H., Nguyen, M.N., Foliente, G.C., 2005. Engineering models for biological attack on timber structures. In: Proceedings of the 10th Conference on Durability of Building Materials and Components, TT4-217, Lyon, France, 2005.
- Leicester, R.H.; Wang, C.H., Nguyen, M.N.; Mackenzie, C.E., 2009. Design of exposed timber structures. *Australian Journal of Structural Engineering*, Vol 9(3), 217-224. <https://doi.org/10.1080/13287982.2009.11465024>.
- Li H., Perrin, M., Eyma, F., Jacob, X., Gibiat, V., 2018. Moisture content monitoring in glulam structures by embedded sensors via electrical methods. *Wood Sci Technol* 52:733–752. <https://doi.org/10.1007/s00226-018-0989-y>
- Lisø, K.R., Hygen, H.O., Kvande, T.; Thue, J.V., 2006. Decay potential in wood structures using climate data. *Build. Res. Inf.* 34, 546–551. <https://doi.org/10.1080/09613210600736248>
- Marteinsson, B., 2003. Durability and the factor method of ISO 15686-1. *Building Research & Information*, 31(6), 416–426. <https://doi.org/10.1080/0961321032000105412>
- Martonne, E., 1942. Nouvelle carte mondiale de l'indice d'aridité. *Annales de Geographie* tome LI: 241–250.
- Meyer-Veltrup, L., Brischke, C., 2015. Fungal decay at different moisture levels of selected European-grown wood species. *Int. Biodeter. Biodegr.* 103:23–29. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.04.009>
- Meyer-Veltrup, L., Brischke, C., Goritzka, C., Hundhausen, U., 2016. Formation of cracks in wooden elements – design; moisture and durability aspects. COST FP 1303 4th Conference 'Designing with bio-based building materials – challenges and opportunities' 24-25 February 2016; Madrid; Spain.

- Meyer-Veltrup, L., Brischke, C., 2017. Design and performance prediction of timber structures based on a factorization approach. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, IRG/WP 17-20603. IRG, Stockholm.
- Meyer-Veltrup, L., Brischke, C., Alfredsen, G., Humar, M., Flæte, P.O.; Isaksson, T., Larsson-Brelid, P., Westin, M., Jermer, J., 2017. The combined effect of wetting ability and durability on outdoor performance of wood–Development and verification of a new prediction approach. *Wood Sci. Technol.* 51, 615–637.  
<https://doi.org/10.1007/s00226-017-0893-x>
- Meyer-Veltrup, L., Brischke, C., Niklewski, J., Frühwald Hansson, E., 2018. Design and performance prediction of timber bridges based on a factorization approach. *Wood Mat. Sci. Eng.*, 13, 167–173. <https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1424729>
- Ministerio de Fomento, 2009. Documento Básico SE-M Seguridad Estructural Madera. Código Técnico de la Edificación.
- Ministerio de Fomento, 2017. Documento descriptivo climas de referencia. <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/20170202-DOC-DB-HE-0-Climas%20de%20referencia.pdf>. (Last access, feb. 2021).
- Morris, P., Winandy, J.E., 2002. Limiting Conditions for Decay in Wood Systems. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, IRG/WP 02-10421.
- Morris, P.I., McFarling, S., Wang, J., 2008. A new decay hazard map for North America using the Scheffer Index. In Proceedings of the IRG Americas Regional Meeting, Playa Flamingo, Guanacaste, Costa Rica, 30 November–2 December 2008.
- Naciones Unidas, 1987. "Nuestro futuro común". Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Accesible en <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N87/184/70/PDF/N8718470.pdf?OpenElement>
- Nguyen M. N., Leicester R. H., Wang C.-H., Foliente G.C., 2008. A Draft Proposal of AS1720.5 – Timber Service Life Design Code, CSIRO Sustainable Ecosystems, Forest & Wood Products Australia.
- Nijland, T.G., Adan, O.C.G., Van Hees, R.P.J., van Etten, B.D., 2009. Evaluation of the effects of expected climate change on the durability of building materials with suggestions for adaptation. *Heron* 54(1), 37-48.
- Nikolitsa, G., Giarma, C., 2019. Estimation of decay potential of wooden elements above ground in Greece. *Building and Environment* 154, 155–166.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.001>
- Niklewski, J., Frühwald Hansson, E., Brischke, C., & Kavurmaci, D., 2016. Development of decay hazard maps based on decay prediction models. In Proceedings of the IRG Annual Meeting, Lisbon, Portugal, 15–19 May 2016. (International Research Group on Wood Protection; Vol. 16).
- Niklewski, J., Fredriksson, M., Isaksson, T., 2016. Moisture content prediction of rain-exposed wood: Test and evaluation of a simple numerical model for durability applications, *Building and Environment*, 97, 126-136.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.037>
- Niklewski, J., Isaksson, T., Frühwald Hansson, E., Thelandersson, S., 2018. Moisture conditions of rain-exposed glue-laminated timber members: the effect of different detailing. *Wood Material Science&Engineering* 13 (3), 129–140.  
<https://doi.org/10.1080/17480272.2017.1384758>
- Niklewski, J., Fredriksson, M., 2019. The effects of joints on the moisture behaviour of rain exposed wood: a numerical study with experimental validation, *Wood Material Science & Engineering*, 16:1, 1-11.  
<https://doi.org/10.1080/17480272.2019.1600163>

- Niklewski, J., Brischke, C., Frühwald Hansson, E., 2019. Numerical study on the effects of macro climate and detailing on the relative decay hazard of Norway spruce, *Wood Material Science & Engineering*, 16:1, 12-20.  
<https://doi.org/10.1080/17480272.2019.1608296>
- Olsson, L., 2014. Moisture conditions in exterior wooden walls and timber during production and use. Licentiate thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Building Technology, Chalmers University of Technology, Gothenburg.
- Osawa, T., Maeda, K., Tsunetsugu, Y., Shida, S., 2019. Influence of surface checks on wood moisture content during wetting and re-drying. *Eur. J. Wood Prod.* 77, 681–689.  
<https://doi.org/10.1007/s00107-019-01423-w>
- PNE-prEN 460: 2020. Durability of wood and wood-based products - Natural durability of solid wood - Guide to the durability requirements for wood to be used in hazard classes. European Committee for Standardization (CEN).
- PNE-prEN 16818:2017. Durability of wood and wood-based products – Moisture dynamics of wood and wood-based products. European Committee for Standardization (CEN).
- Popper, R., Niemz, P., 2009. Wasserdampfsorptionsverhalten ausgewählter heimischer und überseeischer Holzarten. *Bauphysik* 31, 117–121.  
<https://doi.org/10.1002/bapi.200910017>
- Rapp, A.O., Peek, R.D., Sailer, M., 2000. Modelling the moisture induced risk of decay for treated and untreated wood above ground. *Holzforschung* 54 [2],111-118.  
<https://doi.org/10.1515/HF.2000.019>
- Ross, L., Mattson, J., Alfredsen, G., 2008. In-service performance of wood depends upon the critical in-situ conditions. Case studies. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, IRG/WP08-20382.
- Rydell, Å., Bergström, M., Elowson, T., 2005. Mass loss and moisture dynamics of Scots pine (*Pinus sylvestris*) exposed outdoors above ground in Sweden. *Holzforschung* 59(2),183-189. <https://doi.org/10.1515/HF.2005.029>
- Samuelsson, A., 1990. Resistanskurvor för elektriska fuktkvotsmätare. TräteknikCentrum, Rapport L 9006029. Stockholm. 37 pp.
- Samuelsson, A., 1992. Calibration curves for resistance-type moisture meters. Paper presented at the 3rd IUFRO International Wood Drying Conference, Vienna, 18–21 August 1992.
- Scheffer, T.C., 1971. A climate index for estimating potential for decay in wood structures above ground. *Forest Products Journal* 21 (10): 25-31.
- Schmidt, O., 2006. Wood and tree fungi. Biology, damage, protection, and use. Berlin: Springer; 336 pp. <https://doi.org/10.1007/3-540-32139-X>
- Setliff, E.C., 1986. Wood decay hazard in Canada based on Scheffer's climate index formula. *The Forest Chronicle*, Oct., 456-459.
- Smith, S.L., Hill, S.T., 1982. Influence of temperature and water activity on germination and growth of *Aspergillus restrictus* and *Aspergillus versicolor*. *Transactions of the British Mycological Society* Vol 79. H 3, 558 – 560.
- Stringer, G.R., 1993. The development of reliability-based durability design methods for timber structures. Gottstein Fellowship Report, Gottstein Memorial Trust Fund, CSIRO Forestry and Forest Products, Clayton, Australia.

- Suttie, E., Brischke, C., Meyer, L., Van Acker, J., Kutnik, M., Heisel, E., Englund, F., Jermer, J., Thelandersson, S.; Polášek, M., Lorenzo, D., 2014. Performance classification of wood in construction – drafting a user-friendly European standard. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, IRG/WP 14-20545.
- Tannert, T., Müller, A., Vogel, M., 2010. Structural health monitoring of timber bridges. International Conference on Timber Bridges (ITCB 2010). Lillehammer, Norway 12-15 September 2010.
- Tannert, T., Vogel, M., Berger, R., Müller, A., 2011. Remote moisture monitoring of timber bridges: a case study. 5th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-5), 11-15 December 2011, Cancún, México
- Thelandersson, S., Isaksson, T., Frühwald, E., Toratti, T.; Viitanen, H., Grull, G., Jermer, J.; Suttie, E., 2011. WoodExter-Service life and performance of exterior wood above ground. Report TVBK-3060. ISBN 978-91-979543-0-3. Lund University, Sweden.
- Thelandersson, S., Isaksson, T., 2013. Mould resistance design (MRD) model for evaluation of risk for microbial growth under varying climate conditions. Building and Environment 65, 18-25. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.03.016>
- Thybring, E.E., Kymäläinen, M., Rautkari, L., 2018. Experimental techniques for characterising water in wood covering the range from dry to fully water-saturated. Wood Sci Technol 52, 297–329. <https://doi.org/10.1007/s00226-017-0977-7>
- Unión Europea. Directiva 98/8/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de febrero de 1998, relativa a la comercialización de biocidas. Diario oficial de la Unión Europea, nº 123, de 24 de abril de 1998, 1-63.
- Unión Europea. Reglamento Europeo (EU) nº305/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo de 9 de marzo de 2011 por el que se establecen condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción y se deroga la Directiva 89/106/CEE del Consejo. DOUE 4.4.2011 L 88/5. Bruselas.
- Van den Bulcke, J., Van Acker, J., De Smet, J., 2009. An experimental set-up for real-time continuous moisture measurements of plywood exposed to outdoor climate. Building and Environment, 44(12), 2368-2377. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.03.021>
- Vermaas, H.F., 1982. D.C. Resistance Moisture Meters for Wood. Part I: Review of Some Fundamentals Considerations. South African Forestry Journal, 121:1, 88-92. <https://doi.org/10.1080/00382167.1982.9628815>
- Viitanen, H., Ritschkoff, A.-C., 1991. Mould growth in pine and spruce sapwood in relation to air humidity and temperature. Report No. 221. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products, 49 pp.
- Viitanen, H., 1997a. Modelling the time factor in the development of mould fungi- effect of critical humidity and temperature conditions in pine and spruce sapwood. Holzforschung 51(1), 6-14. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1997.51.1.6>
- Viitanen, H., 1997b. Modelling the time factor in the development of brown rot decay in pine and spruce sapwood-the effect of critical humidity and temperature conditions. Holzforschung 1997, 51(2), 99-106. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1997.51.2.99>
- Viitanen, H., Ojanen, T., 2007. Improved model to predict mould growth in building materials. In: Proceedings of the 10th Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings Conference, ASHRAE.
- Viitanen, H., Toratti, T., Peuhkuri, R., Ojanen, T., Makkonen, L., 2009. Evaluation of exposure conditions for wooden facades and decking. Document IRG/WP 09-20408. International Research Group on Wood Protection, Stockholm.

- Viitanen, H., Toratti, T., Makkonen, L., Peuhkuri, R., Ojanen, T., Ruokolainen, L., Räsänen, J., 2010. Towards modelling of decay risk of wooden materials. *Eur. J. Wood Prod.* 68, 303–313. <https://doi.org/10.1007/s00107-010-0450-x>
- Viitanen, H., Toratti, T., Makkonen, L., Pehkuri, R., Ojanen, T.; Thelandersson, S., Isaksson, T., Frühwald Hansson, E., 2011. Climate data: Climate conditions in Europe. VTT working papers 181. ISBN 978-951-38-7523-7. VTT Technical Research Centre of Finland. <https://publications.vtt.fi/pdf/workingpapers/2011/W181.pdf>
- Wang, J. Wu, X., Jiang, M., Morris, P.I., 2007. Decay hazard classification in China for exterior above-ground wood. In: Proceedings of the IRG Annual Meeting, Jackson Lake Lodge, WY, USA, 20–24 May 2007.
- Wang, J., Morris, P.I., 2008. Effect of climate change on above-ground decay hazard for wood products according to the Scheffer index. *CWPA Proceedings, 2008*, 92-103 © Canadian Wood Preservation Association
- Wang, C.H., Leicester, R.H., Nguyen, N.H., 2007. Manual num. 4, Decay Above-Ground. Forest Products Australia (FWPA). <https://publications.csiro.au/rpr/download?pid=legacy:2380&dsid=DS1>



