8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

2022 Lleida 27 · 1 junio · juny julio · juliol Cataluña Catalunya

La **Ciencia forestal** y su contribución a los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

8CFE - 173

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022
ISBN 978-84-941695-6-4
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza

Sociedad Española de Ciencias Forestales SECF

Caracterización funcional de la madera al exterior fuera del contacto con el suelo

CONDE GARCÍA, M.[1], CONDE GARCÍA, M.[2], FERNANDEZ-GOLFIN SECO, J.I.[1]

[1] Departamento de Productos Forestales, Grupo de Madera y corcho. INIA-CIFOR, Carretera de la Coruña km 7,5 28040 Madrid.
[2] Universidad de Córdoba, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y Montes, Edificio Leonardo Da Vinci, Campus de Rabanales, Carretera Nacional IV, km 396. 14071 Córdoba.

Resumen

En este estudio se efectúa una síntesis de los trabajos llevados a cabo desde mediados de los años 90, orientados hacia la parametrización de la prescripción de la durabilidad y el establecimiento de un método de comprobación del diseño y de la vida en servicio basado en un límite de servicio.
Se comienza efectuando un análisis del estado del arte sobre la modelización de la degradación de la madera al exterior, básica para el establecimiento de los factores contribuyentes a la degradación y/o resistencia de la madera ante la acción de los hongos de pudrición, y se continúa con un análisis de la contribución española a dicho estado del arte y muy especialmente del sistema de asignación de clases de uso y de la herramienta creada para dicho fin.
Se finaliza el estudio con la extracción de una serie de conclusiones y recomendaciones generales sobre el estado actual del arte y la mejor forma de impulsarlo en el futuro.

Palabras clave

Pudrición, clases de uso, modelización, comportamiento al exterior de la madera.

1. Análisis del estado del Arte sobre modelización de la degradación de la madera al exterior

Desde hace décadas se conoce que la durabilidad es uno de los aspectos más limitantes para el uso de madera en la construcción y que su abordaje práctico exige el desarrollo de métodos normalizados.

Ante la necesidad de incorporar la durabilidad en su código de práctica constructiva, a mediados de los años 90 se puso en marcha en Australia 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 en 1990, 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.

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 cada vez más restrictiva Directiva de Biocidas 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; Marteinsson, 2003; Elowson *et al*, 2003; Hedley *et al* 2004; Leicester *et al*, 2005; Rydell, 2005; Brischke et al, 2006, 2008; Brischke y Rapp, 2008&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&b&c) 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&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 inecuación siguiente:

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

De acuerdo con Marteinsson (2003) era posible aplicar el método factorial de la norma ISO 15686-1 al cálculo de ambos miembros de la inecuación [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 la falla del elemento en cuestión.

De acuerdo con Thelandersson *et al* (2011), Issakson&Thelandersson (2013b) e Issakson *et al* (2015), en la inecuación [1] la exposición ha de caracterizarse 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, aleros, distancia al suelo, diseño de detalles, etc.).

Análogamente, en la inecuación [1] la resistencia de diseño del material se ha de calcular considerando una dosis crítica de degradación válida para todas las maderas, modificada mediante los factores que afectan a esta resistencia básica.

En la actualidad existe un borrador 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 inecuación [1].

A.- Cálculo del valor de la Exposición

Para el cálculo del valor característico de la 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 ha de ser definido para cada lugar en función de la evolución anual esperada del clima material (temperatura y contenido de humedad).

Para la determinación del índice básico de exposición se han seguido diversas aproximaciones:

1. Modelizando la cinética de la pudrición

Existen dos aproximaciones distintas:

a) 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.

b) 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.

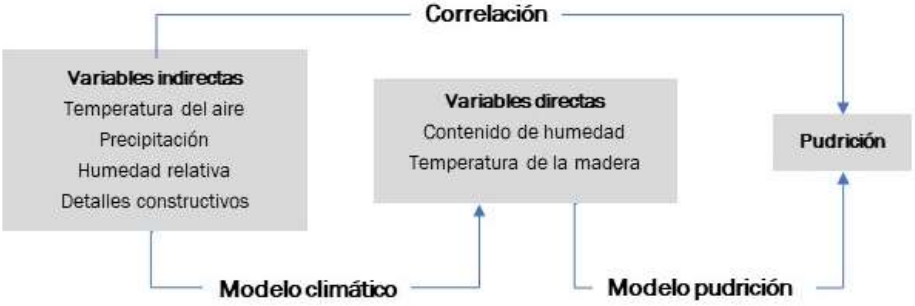

Figura 1. Relación entre variables indirectas, directas y pudrición (Niklewski et al 2019).

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.

Respecto de 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:

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

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:

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

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

Entre los valores cardinales mínimo (0ºC) y máximo (40ºC) por efecto de la temperatura (que ambos generan valores de d_T=0) se empleó la regla de que por cada 10ºC 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 hicieran acto de presencia las pudriciones.

Estos mismos autores (Brischke y Rapp, 2010a; Brischke *et al*, 2011), propusieron un segundo modelo (Modelo II), más completo en su formulación, 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:

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

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

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 del secado, 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 del modelo climático propuesto por Brischke *et al* (2011) y Früwald *et al* (2012) es su falta de resolución espacial y la provisionalidad de todos los coeficientes que emplea, tanto para el cálculo del componente por lluvia como para el correspondiente por secado.

Con posterioridad, Brischke *et al* (2013) efectuaron ligeras correcciones a su modelo de 2011, 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:

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

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 I, 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:

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

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 (Tª≤0ºC ó T°>40º, MC<25%) no solo se para 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 en el modelo de cálculo de dosis.
En este nuevo modelo el cálculo de la dosis anual sigue el patrón de la ecuación [9], cambiando la fórmula de cálculo de los componentes $d_{MC}(MC_i)$ y $d_T(T_i)$, que ahora serían calculados haciendo uso de las expresiones siguientes:

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

$$d_T(T_i) = \begin{cases} 1 & para\ MC_i < a \\ 0 & para\ T < c\ y\ MC \ge a \\ \frac{T}{d-c} & para\ 0ºC \le T\ y\ MC \ge a \\ 1 & para\ T > d\ y\ MC \ge a \end{cases} \quad [13]$$

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 0ºC
d: límite superior de T para el desarrollo de los hongos, que se toma provisionalmente en 30ºC
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 Früwald *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.

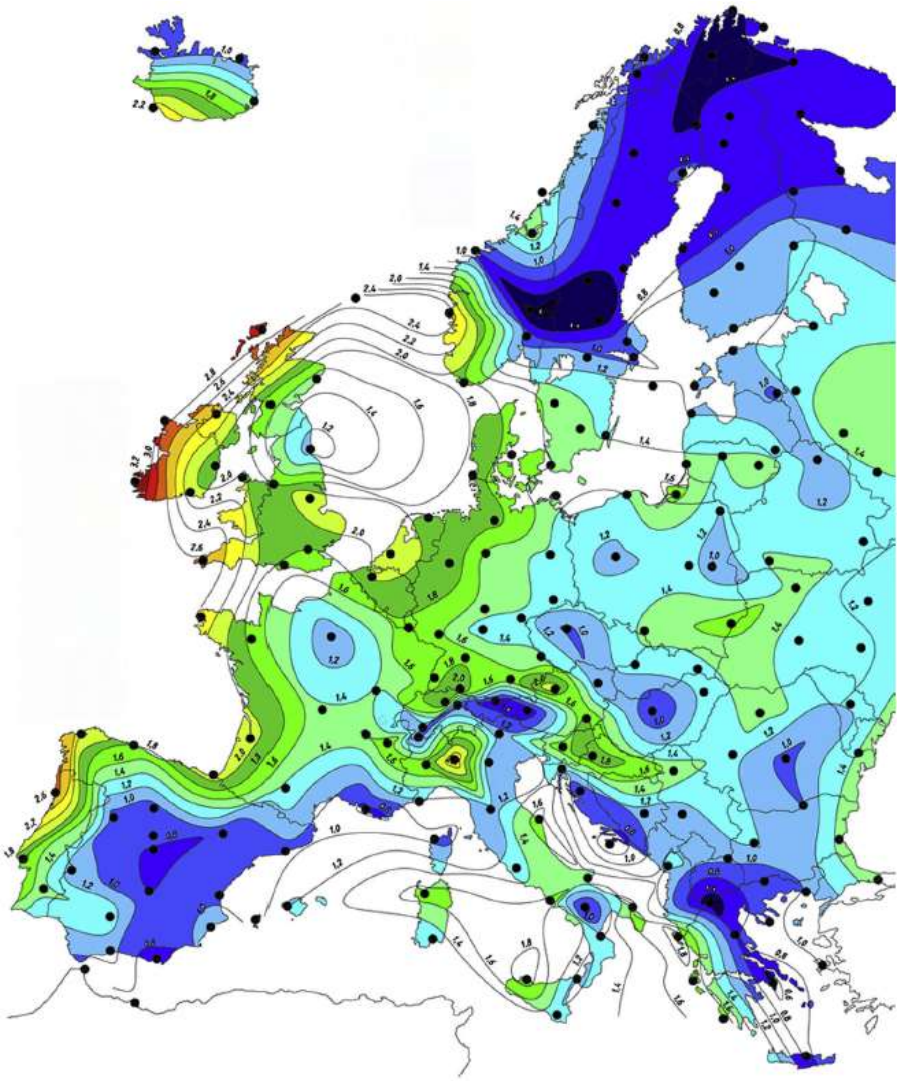

Figura 2. Índices relativos de riesgo europeos, respecto de la estación de Uppsala (Brischke et al, 2011, Frühwald Hansson et al, 2012).

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* (2019), 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 haciendo 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.

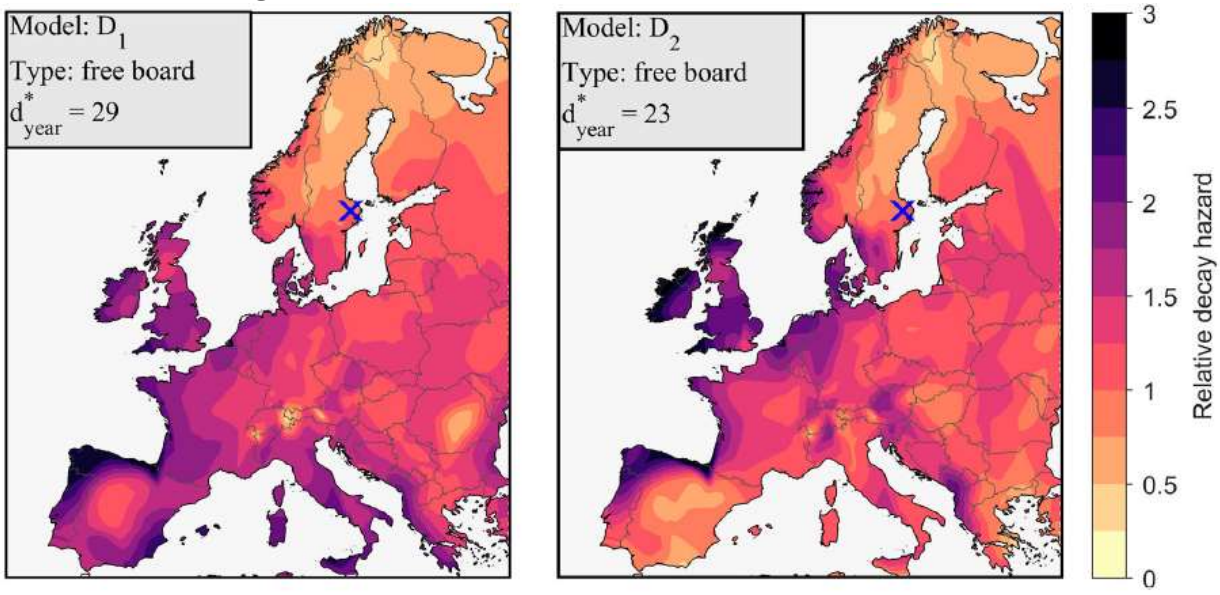

Figura 3. Mapas de riesgo relativo de pudrición en Europa, calculados mediante los modelos Logístico Simplificado (D_1) y Logístico (D2). La cruz representa la estación de referencia de Uppsala (Suecia), en la que el riesgo relativo se considera 1.0. El valor de la dosis anual en la estación de referencia 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 (D2). (Niklewski et al, 2019).

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 critica 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 micro-climas 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.

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 α 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:

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

Las dosis d_H y dT 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.

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

y

$$d_T = \begin{cases} e^{2.0 \cdot ln\left(\frac{T_{12}}{20}\right)} \; Si \; 0.1 < T_{12} \leq 30 \; ºC \; y \; d_H > 0 \\ 1 \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad si \; d_H < 0 \end{cases} \text{ [15]}$$

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

a) 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.
b) 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.
c) Falta la verificación de sus resultados con resultados reales, lo que los propios autores indican en su estudio.
d) La aproximación es muy teórica y, de momento, no habiendo habido desarrollos posteriores en la misma.
e) 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:

a) 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 éste precisamente uno de sus puntos más débiles.
b) 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.
c) 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.
d) Que, al existir hongos diversos con cinéticas degradativas diversas, en puro rigor habría que construir modelos distintos para cada uno de ellos.

e) 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.
f) 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*, 2019).
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^2 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 solo 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 4). 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.

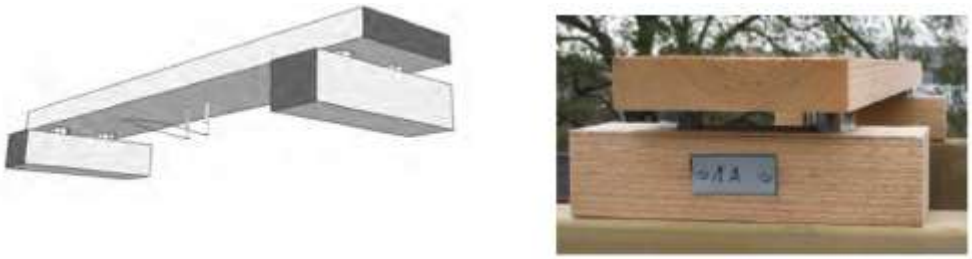

Figura 4. Dispositivo de ensayo "tipo" (Thelandersson et al, 2011).

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 ha establecido una base de datos en la que pueden subirse 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. 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, numerosos han sido 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; Fernandez-Golfin *et al* 2012 y 2014; Fortino *et al* 2013; Hasan *et al* 2013; Brischke y Lampen 2014; Olsson 2014; Dietsch *et al* 2015ayb; 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 no es fiable (Brischke *et al* 2018).

2. Mediante el empleo de índices climáticos

En este caso, el índice básico ha de ser obtenido a través del valor obtenido usando alguno de los índices climáticos de utilidad para la factorización del riesgo de pudrición.
El más importante trabajo sobre 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 sofisticados modelos antes vistos, con los que se obtienen resultados mesurables 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 ºC. 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 ≤SCI< 65)
- Zona 3 (Riesgo alto), para valores del SCI ≥ 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 EEUU 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 predecir la vida en servicio.
El SCI ha sido usado en la construcción de mapas de riesgo en varios países y regiones como Canadá (Setliff 1986), Norte América (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 (Fernandez-Golfin *et al* 2016), Grecia (Kikolitsa y Giarma, 2019) y Europa en global (Brischke *et al* 2011, Nijland *et al* 2014, Niklewski *et al* 2016, 2019).

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 (Fernandez-Golfin *et al,* 2016) o el diseño de los detalles constructivos entre otros parámetros (Wang *et al,* 2008).

Akita *et al* (2014) usaron datos meteorológicos 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*. (2019) 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 5 se recoge el mapa publicado por Niklewski *et al*. (2019), 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. Análogamente, Brischke *et al*. (2011) (figura 6) 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.

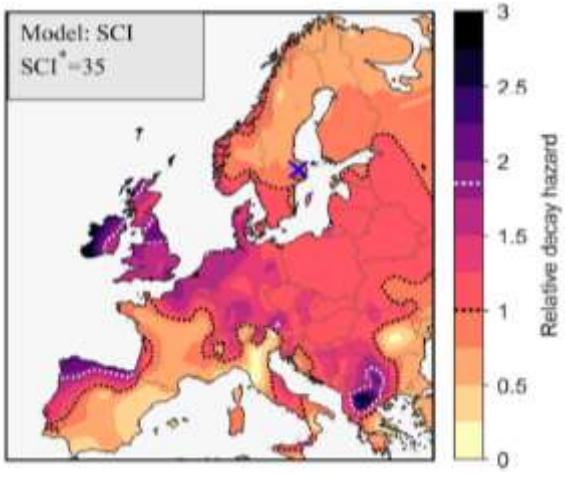

Figura 5. Mapa de riesgo relativo de pudrición en Europa, calculado mediante el índice Scheffer. La cruz marca el sitio de referencia (Uppsala) para el que el índice relativo de riesgo se iguala a uno, con un SCI igual a 35. Las líneas de puntos establecen los límites de las tres zonas en las que puede subdividirse el territorio europeo empleando la subdivisión zonal propuesta originalmente por Scheffer (1971). (Niklewski et al 2019).

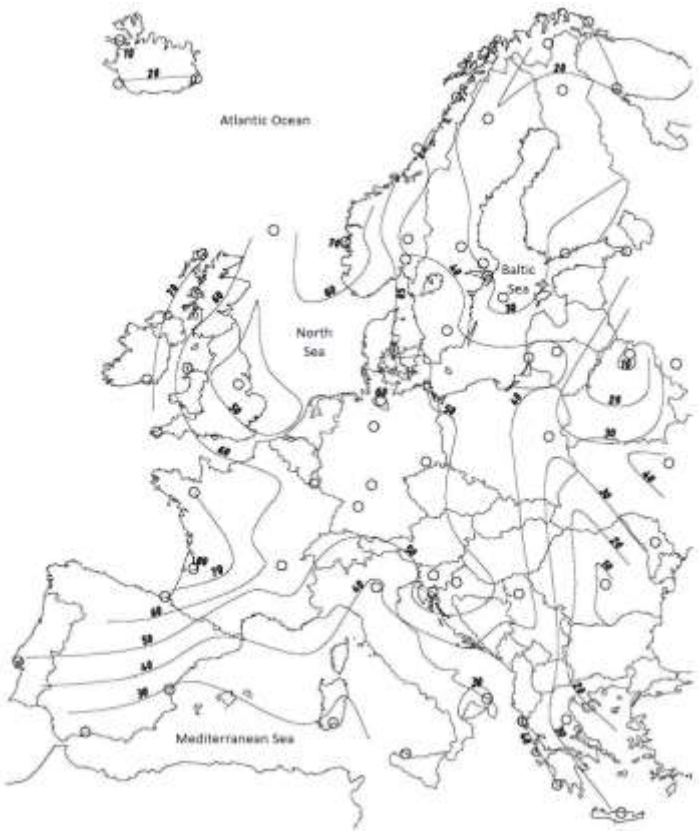

Figura 6. Mapa de riesgo de pudrición en Europa, según el valor absoluto del índice Scheffer (Brischke et al 2011). Un mapa de isolíneas de índice relativo podría obtenerse dividiendo los valores absolutos del índice entre 35, valor del SCI en la estación de referencia de Uppsala (Suecia).

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, de uso en la 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:

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

Donde:

I_R 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.

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 es por lo que en la expresión [2] el valor del índice básico de exposición (I_{s0}) viene multiplicado por una serie de factores, entre los que es corriente (lista no exhaustiva) añadir los siguientes (Fernández-Golfín *et al*, 2018):

k_{s1}*:* factor de exposición básica, que mayora o minora en función de la mayor o menor severidad de la exposición local a la humedad (mesoclima).

k_{s2}: factor por geometría del elemento, que mayora o minora 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 mayora o minora en función del vuelo y orientación del alero respecto de los vientos dominantes de lluvia.

k_{s4}: factor por sobreelevación del suelo, que mayora o minora 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 mayora o minora 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* 2019, Niklewski y Fredicksson 2019, Conde *et al* 2021) y guías de diseño constructivo (Jermer *et al* 2011, Thekandersson *et al* 2011, Viitanen *et al* 2011, Isaksson *et al* 2015, Fernández-Golfin *et al* 2018), en los que se analiza el comportamiento de la madera en diversas soluciones constructivas (especialmente fachadas y suelos al exterior) pero mayoritariamente efectuados en climas del norte de Europa y se proponen valores de los coeficientes anteriormente señalados.

De momento, ni existen valores universalmente aceptados para estos coeficientes (k_{si}) ni normas de carácter transnacional (CEN, ISO) que los incluyan. Otro tanto puede afirmarse respecto del 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.

B.- Cálculo del valor de la Resistencia

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

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

En la expresión [18] 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 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 “Exposición” de la inecuación

[1], los factores (D_{crit}, k_{wa}, k_{inh}) tienen carácter relativo y por ello deben ser calculados respecto del material considerado como de referencia: la madera de Abeto rojo (*Picea abies*) sin tratar, de dimensiones 22x95x500 mm³, 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. <u>Mediante el empleo de modelos dosis-respuesta</u>

Brischke y Rapp (2010a), trabajando sobre albura de pino silvestre y duramen de Abeto Douglas, 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).

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

Esta expresión [19] queda gráficamente reflejada en la figura 7:

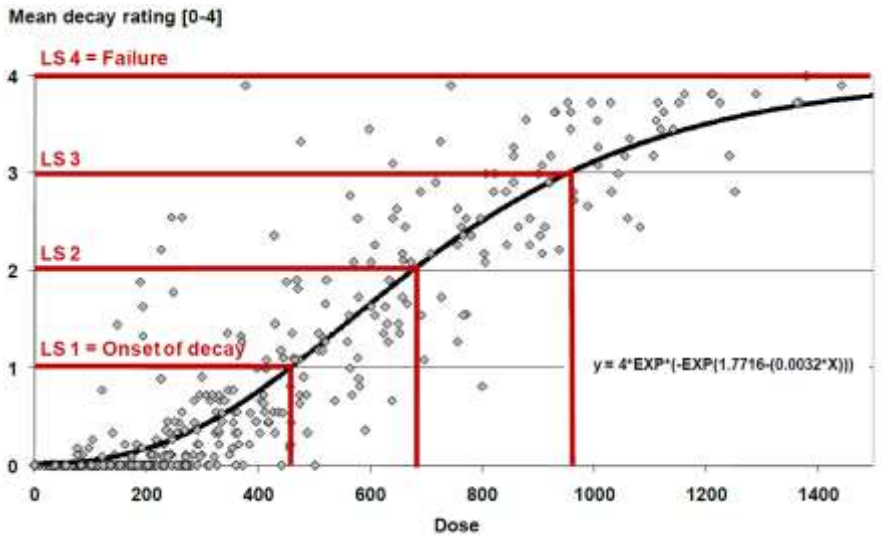

Figura 7. Relación entre la dosis de degradación calculada con el Modelo (I) dosis-respuesta y el nivel de pudrición evaluado según la norma EN 252:1989. LS = estado Límite de Servicio (Brischke et al, 2010c).

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 no puede ser sino 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 inecuación [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.

2. Mediante el empleo de otros modelos

Sobre la misma base experimental de Vitanen (1997a), Hukka y Vitanen (1999), primero, e Isaksson *et al* (2010), después, reformularon el modelo inicial de Vitanen (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:

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

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

Otros autores que intentaron también aproximarse hacia la determinación del momento en el que la presencia de mohos se 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 EN 352. 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.

Los estudios de Viitanen (1997a), Hukka y Vitanen (1999), Isaksson *et a*l (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 Tª y HR constantes) y el resultado no se da en términos de dosis sino de días.

Viitanen *et al* (2010) con su modelo de pérdida de masa también intentaron 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}), varios métodos no normalizados han sido propuestos (Van Acker *et al* 2014). Brischke *et al* (2014) y posteriormente Meyer-Veltrup *et al* (2017) compararon entre sí todos los métodos existentes hasta ese momento de utilidad 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.

Brischke *et al*. (2014), primero, e Isaksson *et al* (2015), después propusieron los valores de k_{wa} y k_{inh} contenidos en la tabla 1, expresados de forma relativa respecto del comportamiento de la madera de abeto rojo (*Picea abies*), la cual es el material de referencia, al que le corresponde un valor de $k_{wa}/\ k_{inh}$ = 1.0.

Tabla 1. Valores de k_{wa} y k_{inh} propuestos por Brischke *et al* (2014) e Isaksson *et al* (2015).

Especie de madera	k_{wa}	k_{inh}
Abeto rojo (*Picea abies*) (1)	1.0	1,0
Albura de Pino silvestre (*Pinus sylvestris*)	0.8	1,0
Duramen de pino silvestre (*Pinus sylvestris*)	1.5	1,5
Duramen de alerce europeo (*Larix decidua*)	1.5	1,5
Duramen de alerce siberiano (*Larix sibirica*)	1.5	1,5
Duramen de abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii*)	1.5	1,5
Duramen de Roble europeo (*Quercus robur*)	1.0	1,5
Duramen de Robinia (*Robinia pseudacacia*)	1.5	2,5
Duramen de cedro rojo (*Thuja plicata*)	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 furfurilada de pino radiata, Pino amarillo y Pino silvestre (WPG (2) ca50%)	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
No existe diferencia significativa entre albura y duramen WPG=Porcentaje de ganancia de peso) 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		

Es necesario hacer notar 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 1 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) llaman la atención sobre la necesidad de emplear el sentido común y la experiencia.

Conde *et al* (2021b) 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} 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 tomada como de referencia fue la de abeto rojo (*Picea abies*).

Tanto en el caso de los trabajos de Brischke *et al* (2014) como en los de Conde *et al* (2021b) 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 signiticativo en el contenido de humedad, Osawa *et al* (2019), trabajando sobre sequoia (*Sequoia sempervirens*) y cedro japonés (*Cryptomeria japonica*), demostraron que fendas de más de 20 mm de profundidad incrementaban el riesgo de pudrición.

2. Contribución española al estado del Arte

La actividad española en el ámbito del comportamiento funcional de la madera al exterior fuera del contacto del suelo ha gravitado alrededor de los dos proyectos que seguidamente se detallan, ambos ejecutados en el grupo de madera y corcho del INIA-CIFOR con colaboraciones de las Universidades de Córdoba, Valladolid, Huelva y Politécnica de Madrid, así como con las de AITIM y algunos particulares. Los dos proyectos citados son los siguientes:

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

Con la ejecución del primero de los proyectos se pretendía optimizar los sistemas de medida del contenido de humedad de la madera y para ello, en primer lugar, se desarrollaron 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 a 17 maderas distintas (10 frondosas y 7 coníferas), todas ellas muy presentes en los mercados nacional y europeo.

Un segundo resultado de la ejecución 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 estima del contenido de humedad en madera termotratada de pino radiata. Este tipo de madera tenía un creciente interés por el mercado y el pino radiata era de producción nacional por lo que resultaba de gran importancia poner a punto los sistemas de medida con esta madera.

Un cuarto, y tardío, resultado de este primer 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 pinaster (*Pinus pinaster*) y Pino radiata (*Pinus radiata*).

Con estas cuatro realizaciones era posible estimar el contenido de humedad de la madera con una precisión del ±1.0%%, mucho mejor que el ±3.0% reportado hasta entonces para la técnica de medida por resistencia eléctrica (Forsen y Tarvainen, 2000) y, con ello, optimizar la medida de los sistemas de monitorización que se emplearon en la implementación del segundo de los proyectos.

Con la ejecución del segundo de los proyectos (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 los 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 el contexto de este segundo proyecto, siete diferentes dispositivos experimentales fueron desplegados en siete localidades peninsulares (figura 8), elegidas para tener 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* (2011b).

Figura 8. Ubicación de los dispositivos experimentales (Conde et al, 2021b).

En un primer trabajo (Fernández-Golfín *et al* 2016) se llevó a cabo una clasificación territorial del riego de pudrición sobre la base del empleo de índice Scheffer, toda vez que de los dispositivos experimentales anteriormente mencionados todavía no ofrecían datos de utilidad para la modelización. En este primer 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 y que quedaba formulado como sigue:

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

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 ºC. En la expresión [21] se incrementa el efecto de la lluvia con una fracción (N) del número de días en los que hacen 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 (WCS) del Código Técnico de la Edificación español. Los modelos propuestos para las localidades costeras [22] e interiores [23] fueron los siguientes:

IS1= 87.5517 – 53.4837*SCS para localidades costeras (R2= 85.1%) [22]

IS1 = 111.396 – 42.2681*SCS – 38.497*WSC para localidades de interior (R2= 65.2%) [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 2ºC) 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 AEMET 2010), derivando la expresión [24]

EMC = 19,5822 - 0,0323495 * I (R^2 = 83,7%) [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 2ºC) 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 del sector 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, siguiendo el criterio de la tabla 2.

Tabla 2. Criterio de conversión del valor del índice Scheffer en valor del índice de exposición básica (I_{s0})

Valor calculado del índice Scheffer modificado	Calificación de la estación	Índice de exposición básica I_{s0}
IS≤35	Seca	3,0
35< IS≤70	Húmeda	3,3
70< IS≤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)
- ≤12%: 1 punto
- 12%<CHMED≤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_{s0}): 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 3.

Tabla 3. Valores del índice de exposición básica a emplear en elementos ubicados al interior de edificios dotados de envolvente térmica en función de su Clase de Higrometría interior.

Clase de higrometría Interior	I_{s0}
1	**1,0**
2	**1,0**
3	**1,0**
4	**2,0**
5	**3,0**
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. 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 la exposición, los autores propusieron emplear el modelo de Thelandersson *et al* (2011) para la determinación del valor 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 más eficaz y sencilla aplicación de toda esta metodología, los autores diseñaron una herramienta informática que, bajo forma de hoja de cálculo EXCEL, iba preguntando al proyectista sobre todas 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 en función del criterio de asignación de clases de uso de la tabla 4 una clase de uso. Esta herramienta podía 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 9 se recoge el aspecto de la pantalla principal.

Tabla 4. Criterios de asignación de clases de uso en función del valor calculado del índice de exposición característica.

Asignación de clases de uso	
Índice de exposición característica (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 que no se dispusiera 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}).

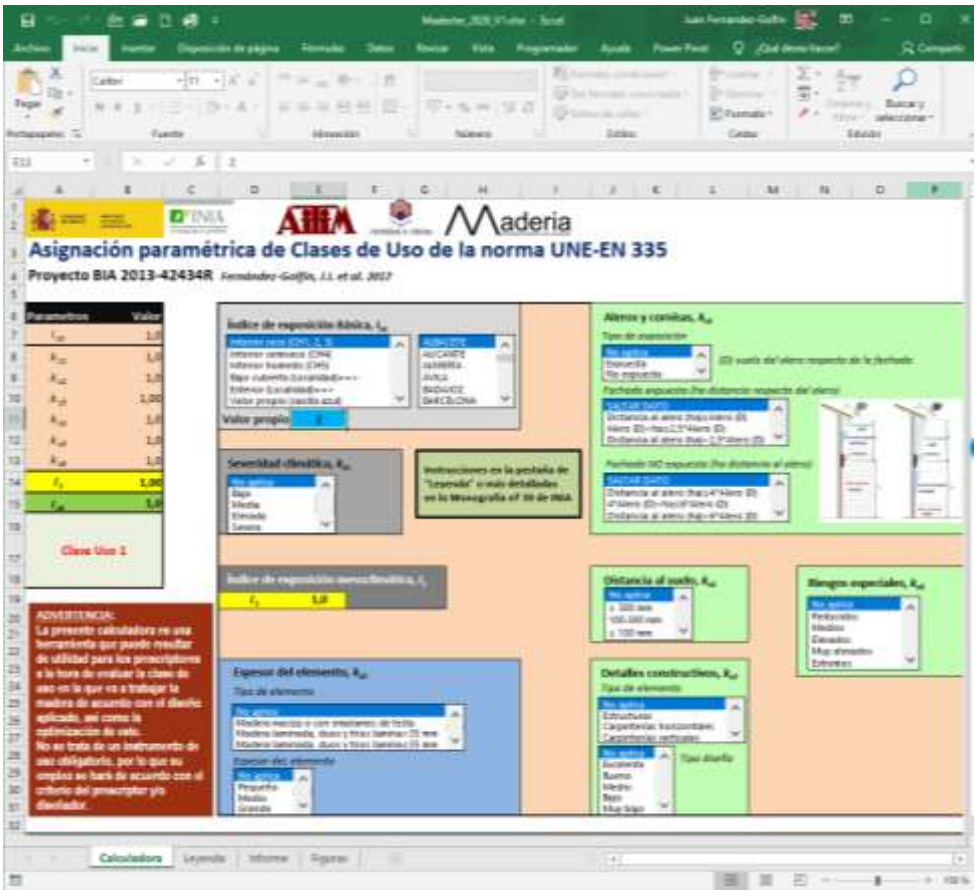

Figura 9. Detalle de la herramienta de asignación de clases de uso.

Para avanzar en la comprobación del efecto del diseño (k_{si}) sobre del índice básico de exposición (I_{S0}), 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-Golfin *et al* (2018); Conde *et al* (2021) 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}).

En su trabajo, Conde *et al* (2021), con un dispositivo experimental ubicado en Madrid (INIA), 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 inferior o igual 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 caliente 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 (recordemos que 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* 2021b), 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 distintos de madera colocados en los dispositivos experimentales por ellos ubicados en diversos puntos de la geografía nacional.

De acuerdo con los resultados experimentales obtenidos, estos 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 entienden establecidos de forma relativa respecto del comportamiento de la madera de referencia, el abeto rojo (*Picea abies*).

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

3. Conclusiones generales y recomendaciones de futuro

De acuerdo con lo visto en los apartados 1 y 2, pueden ser extraídas las siguientes conclusiones generales:

1ª. 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 pero deben confirmarse sus actuales formulaciones con los resultados procedentes de los aún no finalizados experimentos basados en campos de ensayo repartidos por toda la geografía europea, que se han montado de acuerdo con la metodología común de Thelandersson *et al* (2011).
2ª. En tanto los modelos dosis-respuesta no queden plenamente validados, 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.

3ª. El índice Scheffer resulta una herramienta eficaz y sencilla en su aplicación para la determinación de los índices zonales relativos, de utilidad para el cálculo de la dosis básica de cualquier localidad en función de la calculada para la estación de referencia.
4ª. No todos los valores de los factores correctores del índice básico de exposición (I_{s0}) utilizados en las guías constructivas presentes en la bibliografía han sido confirmados experimentalmente, motivo por lo cual todavía se necesita efectuar investigación adicional antes de que el método paramétrico sea plenamente operativo.
5ª. La dosis crítica de pudrición (D_{crit}) debe ser determinada experimentalmente en condiciones cercanas a las de uso, sobre la base del empleo de modelos de dosis-respuesta experimentalmente validados.
6ª. Los valores modificadores de la dosis crítica, k_{wa} y k_{inh}, deben ser determinados para la madera tratada con diferentes productos, tanto en volumen como en barrera, así como para la termotratada por los diferentes sistemas existentes en el mercado.

4. Bibliografía

AEMET (2010). Resúmenes climatológicos de España (http://www.aemet.es/es/conocermas/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, DOI 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.

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. (2006) Decay influencing factors: a basis for service life prediction of wood and wood-based products. Wood Mat Sci Eng 1:91–107 DOI 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 DOI https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.10.001.

BRISCHKE C, OTTO RAPP A, BAYERBACH R, (2008b). Measurement system for long-term recording of wood moisture content with internal conductively glued electrodes. Building and Environment 43: 1566–1574 DOI 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 DOI 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 DOI 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, AO (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 DOI 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. DOI 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 DOI 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. DOI 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. DOI https://doi.org/10.3390/f11050510.

CARLL, CG (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).

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 DOI https://doi.org/10.1007/s13349-014-0081-8.

CONDE GARCÍA, M.; CONDE GARCÍA, M.; FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J.I. (2021) Experimental evaluation of the effect of different design conditions on the risk of decay in solid wood exposed to outdoor climate. Mater Construcc. (Approved for publication, in edition)

CONDE GARCÍA, M.; CONDE GARCÍA, M.; FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J.I. (2021b) Species effect on decay resistance of wood exposed to exterior conditions above the ground in Spain. Mater Construcc. (Approved for publication, in edition)

CONDE GARCÍA, M.; CONDE GARCÍA, M.; FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J.I. (2021c) Improving the accuracy of wood moisture content estimation in four European softwoods growing in Spain. Forest Syst. (Approved for publication, in edition).

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. DOI: 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, KEPP 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. DOI https://doi.org/10.1515/HF.2003.032.

EMMERICH L, BRISCHKE C, SIEVERT M, SCHULZ MS, 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

FERNANDEZ-GOLFIN JI, CONDE GARCIA M, CONDE GARCIA M, FERNANDEZ-GOLFIN JJ, CALVO HARO R, BAONZA MERINO MV, 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 JI, CONDE GARCÍA M, FERNÁNDEZ-GOLFÍN JJ, CONDE GARCÍA M, HERMOSO E, CABRERO JC., (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.

FERNANDEZ-GOLFIN, 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. (2016). 74 [4]: 591-599. DOI https://doi.org/10.1007/s00107-016-1036-z.

FERNÁNDEZ-GOLFÍN SECO, J.I.; PERAZA SÁNCHEZ, F.; TOUZA VÁZQUEZ, M.; ARRIAGA MARTITEGUI, 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).

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 DOI http://dx.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 DOI 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).

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.

HASEGAWA, M. (1996) Relationships between wood protection and climate indexes. Mokuzai Hozon, 22(5): 2–9.

HASAN M, DESPOT R, TRAJKOVIĆ J, RAPP AO, BRISCHKE C, WELZBACHER CR (2013) The Echo (Jeka) Pavilion in Forest-Park Maksimir Zagreb - Reconstruction and Health Monitoring. Advanced Materials Research 778: 765-770 DOI 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 (2ª 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 DOI: https://doi.org/10.3390/f10100903.

HUUKA A, VIITANEN H. (1999) A mathematical model of mould growth on wooden material. Wood Sci Technol 33:475-485 DOI 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 DOI 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 DOI 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. DOI 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 DOI 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

JERMER, J. (EDITOR); THELANDERSSON, S.; VIITANEN, H.; TORATTI, T.; GRÜLL, 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).

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 DOI 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 DOI https://doi.org/10.5658/WOOD.2014.42.6.732.

KRŽIŠNIK, D., LESAR, B., THALER, N.; PLANINSIC, J.; HUMAR, M. (2020) et al. A study on the moisture performance of wood determined in laboratory and field trials. Eur. J. Wood Prod. 78, 219–235 DOI 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 DOI: https://doi.org/10.1080/17480272.2014.894574.

LANATA, F. Monitoring the long-term behaviour of timber structures. J Civil Struct Health Monit 5, 167–182 (2015) DOI https://doi.org/10.1007/s13349-014-0095-2.

LARKIN, G.M.; LAKS, PE (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 Proceedings106 Annual Meeting of the American od protection association. Vol. 106 Hyatt Regency Riverfront Savannah, Georgia May 23-25,2010

LEICESTER, R.H. AND 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. AND 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 No 3: 217-224 DOI 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 DOI 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 DOI 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 DOI 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 DOI 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 DOI https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1424729.

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.

NGUYEN, M. N., LEICESTER, R. H., WANG, C.-H. & FOLIENTE, G. C. (2008) A draft proposal for AS 1720.5.Timber Service Life Design Code", Report to FWPA, CSIRO Sustainable Ecosystems, www.timber.org.au.

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. Estimation of decay potential of wooden elements above ground in Greece. Build. Environ. 2019, 154, 155–166 DOI 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.

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, DOI 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 Sciencie&Engineering 13 (3): 129–140 DOI 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 mater Sci. Eng. (open access) DOI 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, DOI 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 DOI 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).

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. DOI https://doi.org/10.1515/HF.2000.019.

ROSS GOBAKKEN, 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 DOI https://doi.org/10.1515/HF.2005.029.

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. Wood and tree fungi. Biology, damage, protection, and use. Berlin: Springer; 2006. 336 pp. DOI 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.

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.; GRÜLL, 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, DOI https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.03.016.

VAN ACKER J, DE WINDT I, LI W, VAN DEN BULCKE J (2014) Critical parameters on moisture dynamics in relation to time of wetness as factor in service life prediction. International Research Group on Wood Protection, Stockholm, IRG/WP/14-20555

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 DOI http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.03.021.

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 DOI 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 DOI 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.; RÄISÄNEN, J. (2010) Towards modelling of decay risk of wooden materials. Eur. J. Wood Prod. 68, 303–313 DOI https://doi.org/10.1007/s00107-010-0450-x.

HANNU 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 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp). VTT Technical Research Centre of Finland.

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, pp 92-103 © Canadian Wood Preservation Association

WANG, C.H.; LEICESTER, R.H. AND NGUYEN, N.H. (2008). Manual num. 4, Decay Above-Ground. Forest Products Australia (FWPA). (http://www.fwpa.com.au/rd-and-e/market-access/233-technical-manuals-for-timber-service-life-design-guide.html, último acceso enero 2021).