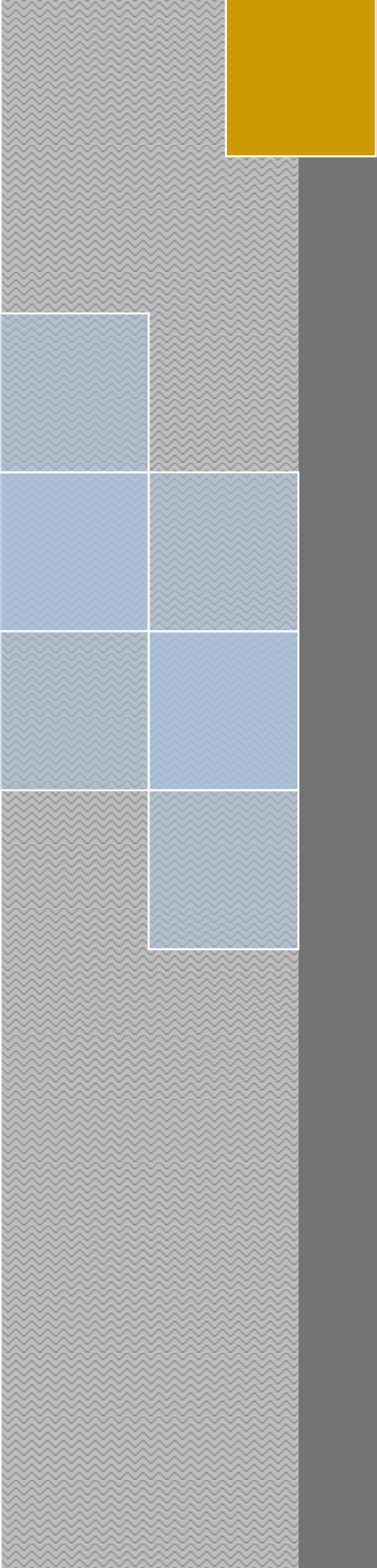




PATINT

Mejora de las prestaciones de un Sistema de Monitorización en Obras de Arte y Construcciones del Patrimonio

Programa: Líneas de I+D independiente del Plan de Actividades de carácter no económico de AIDIMME

Entregable E.1: Resumen de resultados

Breve descripción.

En el presente documento se incluye una recopilación de las principales tareas llevadas a cabo durante la ejecución del proyecto PATINT, con el objetivo de difundir sus resultados.

Realizado por:
AIDIMME

ÍNDICE

1. DESCRIPCIÓN Y OBJETIVO DEL ENTREGABLE	3
2. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECIFICOS DEL PROYECTO PATINT	5
3. ESTADO DEL ARTE EN BIODEGRADACIÓN DE LA MADERA Y EN MÉTODOS Y SISTEMAS PARA DETECTARLA Y MONITORIZARLA EN OBRAS DE ARTE Y ESTRUCTURAS	6
4. SELECCIÓN Y MEJORA DEL SISTEMA MÁS ADECUADO PARA DETECTAR Y MONITORIZAR LA BIODEGRADACIÓN DE LA MADERA EN OBRAS DE ARTE Y ESTRUCTURAS.....	27

1. DESCRIPCIÓN Y OBJETIVO DEL ENTREGABLE

El presente entregable del proyecto PATINT incluye diferentes actividades de investigación aplicada para generar nuevo conocimiento que permita plantear el desarrollo de un sistema con mejoras sustanciales respecto a las herramientas actuales de monitorización preventiva y automatizada de la degradación de materiales, en concreto de la madera y materiales derivados (tableros contrachapados, tableros de fibras, madera laminada encolada, madera microlaminada, etc.).

En la Comunitat Valenciana y en general en el entorno mediterráneo, la madera sufre frecuentemente ataques tanto bióticos (termitas, hongos de pudrición y cromógenos, carcoma fina y gruesa) como abióticos (humedad, salinidad, fuego, radiación solar). Este material, que forma parte de obras de arte y de estructuras de muchos edificios del patrimonio histórico valenciano, necesita por tanto un sistema de monitorización eficaz y que esté adaptado a las tecnologías TIC más recientes.

La falta de monitorización preventiva de la madera tiene como consecuencia:

- a) el deterioro del patrimonio artístico e histórico valenciano, que en algunos casos afecta directamente a la seguridad de los ocupantes y visitantes;
- b) y la necesidad de aplicar tratamientos y rehabilitaciones costosas, a veces con resultados inciertos.



Imagen 1. Degradación de vigas de carga de madera de un palacio renacentista que forma parte del patrimonio histórico valenciano. La degradación ocasionó la curvatura de varios forjados. Fuente: AIDIMME



Imagen 2. Retablo de Felipe de Vigarny en la parroquia de Cardenuela Riopico (Burgos). Este retablo es una de las producciones singulares del maestro Vigarny, uno de los más importantes escultores del Renacimiento. La falta de monitorización preventiva ha causado que se encuentre gravemente deteriorado por la carcoma y que se necesiten 50.000 € solamente para conservarlo tal y como está ahora. Fuente: El País (03/12/2018).

2. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECIFICOS DEL PROYECTO PATINT

Los objetivos concretos del proyecto se exponen a continuación:

- 1) Investigación y análisis de los métodos y sistemas actuales para detectar y monitorizar la biodegradación de la madera en obras de arte y estructuras.
- 2) Establecimiento del rango de valores en las variables de interés y de sus valores límite aceptables.
- 3) Selección de un sensor o varios, de elevada eficacia y sensibilidad, capaces de detectar la presencia de organismos xilófagos en la madera, así como de monitorizar de forma precisa su humedad interna (casi siempre muy distinta de la superficial). Si se considera preciso, se propondrán mejoras en el diseño o implementación del sensor o los sensores.
- 4) Especificación de una arquitectura TIC general y completa en la que se integren los sensores de forma flexible, escalable y con un alcance lo suficientemente grande para salvar las distancias habituales en museos y edificios patrimoniales, así como las barreras arquitectónicas.
- 5) Propuesta de un prototipo (*mock-up*) de interfaz de visualización de la información resultante de la monitorización, en un formato fácil de entender por el usuario (gestor) y compatible con ordenadores, teléfonos inteligentes, tabletas, etc.

Todo lo indicado arriba tiene como objetivo el que los gestores y rehabilitadores puedan optimizar la prevención de estructuras y obras del patrimonio, salvaguardando así la riqueza cultural de la Comunitat Valenciana.

3. ESTADO DEL ARTE EN BIODEGRADACIÓN DE LA MADERA Y EN MÉTODOS Y SISTEMAS PARA DETECTARLA Y MONITORIZARLA EN OBRAS DE ARTE Y ESTRUCTURAS

Tarea 3.1: Biodegradación de la madera y selección de las variables de interés para su prevención y detección

3.1.1. Introducción

La madera es un material de origen natural y, por tanto, corre el riesgo de ser atacada y degradada por insectos y hongos xilófagos. En regiones con clima templado, tanto en áreas urbanas como rurales, se está haciendo cada vez más necesario monitorizar las condiciones estructurales de la madera para permitir la precoz detección de su biodegradación (Unger *et al.* 2001), de una manera preventiva que evite el uso de costosos tratamientos curativos químicos (Blanchette *et al.* 1990; Lewis 2001).

Además de por su efecto en la biodegradación de la madera, explicada más adelante, es importante monitorizar el contenido en humedad de la madera porque contenidos elevados durante períodos extensos (semanas, meses) debilitan fuertemente su resistencia mecánica y aumentan su deformación ante cargas permanentes (fluencia), lo que en ocasiones produce hundimientos de forjados y cubiertas (Arriaga *et al.* 2002).

Además, muchos edificios históricos de madera pertenecen a la herencia cultural y necesitan ser preservados de la degradación (Larsen and Marstein 2016; Khodakovsky and Skjold 2015; Mora *et al.* 2009); y lo mismo ocurre con obras de arte: retablos, altares, cuadros, tallas, estatuas, etc. (Nevin *et al.*, 2018). Debido a las condiciones climáticas, esto resulta especialmente relevante en las regiones mediterráneas de Europa.

3.1.2. Biodegradación de la madera en construcción

En construcciones y edificios, la madera está expuesta a ataques de insectos de las familias *Cossidae* (polilla de la madera), *Siricidae* (avispa de la madera), *Termitidae* (termitas), *Bostrichidae* (falsa carcoma), *Curculionidae* (gorgojo de la madera), *Lyctidae* (polilla de la madera), *Anobiidae* (carcoma fina), *Cerambycidae* (carcoma gruesa), *Scolytidae* (escarabajo descortezador) y *Platypodidae*. Los ataques más frecuentes en la Comunitat Valenciana se deben a termitas, anóbidos, líctidos y cerambíidos.

Todos estos insectos se alimentan de la madera, lo cual ocasiona el deterioro biológico de la pared celular y por consiguiente una significativa reducción de la resistencia físico-mecánica (Blanchette *et al.* 1990). Muchos de ellos atacan madera con un contenido en humedad superior al 20%, especialmente las termitas (Khodakovsky and Skjold 2015).

Las termitas, en particular las termitas subterráneas (*Reticulitermes* ssp.), son los insectos más peligrosos para los edificios de madera situados en regiones de clima templado; por ejemplo, en la Europa mediterránea.



Imagen 3. Degradación por un insecto del género *Anobiidae* (carcoma fina) de la parte superior de una viga de carga de una nave industrial valenciana del siglo XIX. Fuente: AIDIMME.



Imagen 4. Insecto adulto (arriba) y larvas (debajo) de la carcoma común (*Anobium punctatum*). Fuente: collectionstrust.org.uk y AIDIMME, respectivamente.

Cada año, las termitas subterráneas causan daños, tratamientos y reparación de daños en estructuras de madera por valor de más de 700 millones de €uros (UNEP 2017). Las termitas pueden causar grandes daños a edificios en un tiempo relativamente corto y pueden obtener acceso al interior de un edificio por los agujeros o las uniones de la construcción, los cuales están escondidos a la vista, lo cual hace difícil detectarlas (Mora *et al.* 2009). Además, en rangos elevados de humedad, las estructuras de madera están expuestas también a la pudrición por hongos (Arriaga *et al.* 2002). Este ataque por parte de varios agentes es la razón principal para la mala reputación de la madera como material de construcción en condiciones mediterráneas (Gutiérrez Oliva *et al.* 1984; Peraza Sánchez 2002).



Imagen 5. Termitas en un edificio histórico de la Comunitat Valenciana. Fuente: AIDIMME

Las termitas prefieren atacar madera húmeda, pero en el caso de la madera seca son capaces de transportar agua del suelo (Weidner 1970). Por otra parte, los dos grandes parámetros que influyen en la biodegradación por hongos son la temperatura y la humedad. Si se considera la temperatura, la tasa óptima de crecimiento para la mayoría de los hongos degradadores (*Basidiomycota*) está comprendida entre 24 y 35°C. Los hongos degradadores requieren un contenido en humedad de la madera de al menos el 20% para permitir cualquier crecimiento, y contenidos de humedad superiores (más de un 29%) para la germinación inicial de esporas (Weiss *et al.* 2000).

Los tratamientos preventivos y curativos para madera estructural se basan normalmente en productos químicos, muchos de los cuales contienen contaminantes orgánicos persistentes. La monitorización de las plagas y las circunstancias que influyen en ellas es un requisito fundamental para desarrollar estrategias GIP (Gestión Integrada de Plagas). La ventaja de usar estrategias GIP es la sostenibilidad mediante la reducción tanto de pesticidas (persistentes) como de daños al medio ambiente (incluyendo enemigos naturales) y a la salud. Los pesticidas para termitas pueden contaminar los sistemas de agua y entrar en la cadena alimentaria (Pearce 1997; Lewis 2001).

3.1.3. Biodegradación de la madera en obras de arte

En los museos y edificios históricos (iglesias, ermitas, palacios, etc.), la madera de las **obras de arte** (cuadros, tallas, estatuas, altares, retablos, etc.), así como la madera de puertas, ventanas, marcos de cuadros y muebles, puede ser atacada por varios insectos (Querner 2015).

El más común es la carcoma común (*Anobium punctatum*), o al menos lo era hasta que se instaló calefacción en muchos edificios. Esta especie necesita humedad elevada (superior al 16%), que no es normalmente adecuada para almacenar obras de arte. Infecta albura de coníferas, tablero contrachapado, algunos materiales compuestos de celulosa y libros.

La segunda especie más común en museos es el escarabajo del reloj de la muerte (*Xestobium rufovillosum*), un coleóptero cuyas larvas perforan la madera. Esta especie necesita un contenido alto en humedad en la madera (coníferas) y también cierta actividad de hongos en la madera, y es especialmente frecuente en aquellos museos donde el control climático no es posible (p.ej., museos al aire libre).



Imagen 6. Pintura del siglo XVIII (óleo sobre madera) atacada por *Anobium punctatum*. Vista frontal, trasera y detalle con larvas del insecto. Fuente: Wilke et al. 2018

Algunas especies más que atacan a la madera de las obras de arte en museos pertenecen también a la familia Anobiidae: *Ptilinus pectinicornis*, *Nicobium castaneum*,

Oligomerus ptilinoides y la falsa carcoma *Bostrichus capucinus* (Brokerhof et al. 2007; McCaig and Ridout 2012; Pinniger 2015). Estas especies se desarrollan más deprisa que el *Anobium punctatum* (de 2 a 3 años en condiciones normales) y dependen menos de la humedad de la madera.

Son muy frecuentes en el sur de Europa y se están extendiendo por el cambio climático y el uso de calefacción dentro de los museos.



Imagen 7. Retablo barroco del siglo XVI-XVII atacado por *Anobium punctatum*. El retablo se encuentra en la iglesia de San Martín (Grajalero de las Matas, León). Fuente: Diario de León

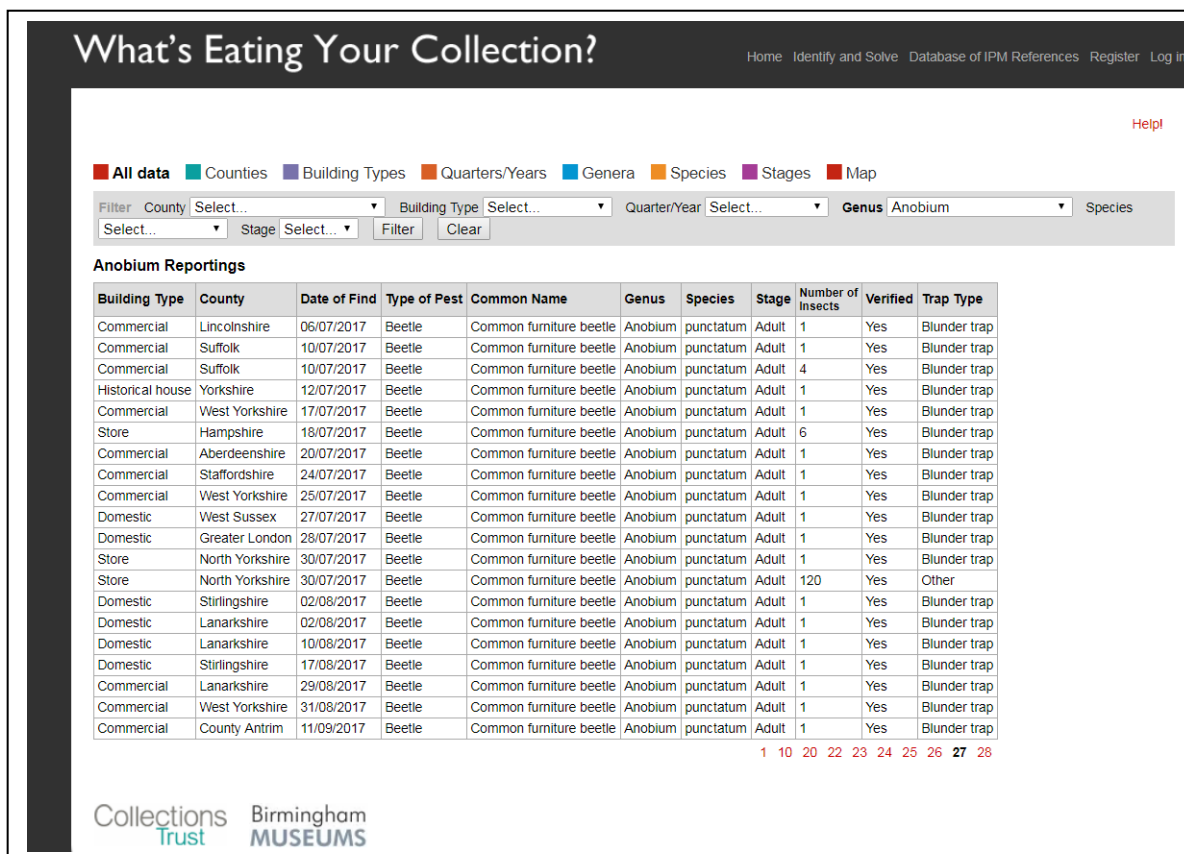


Imagen 8. Ejemplo de registro de ataques en Reino Unido a colecciones de arte por insectos xilófagos del género *Anobium*. Fuente: www.whatseatingyourcollection.com

Las polillas de la madera o líctidos (*Lyctidae*) se alimentan solamente de albura de coníferas y atacan con más frecuencia a la madera estructural que a la madera de obras de arte. Las más comunes son las siguientes: *Lyctus cavicollis*, *Lyctus brunneus*, *Lyctus linearis* y *Lyctus planicollis*. Debido a su rápido desarrollo (un año), pueden causar daños graves en poco tiempo. En la última década han aparecido problemas en museos que han introducido madera nueva (por ejemplo, en marcos de cuadros, suelos de madera o esculturas de arte moderno), y las polillas presentes en ella han infestado a obras de arte y madera de carpintería y han tenido que ser combatidas mediante costosos tratamientos (Unger *et al.* 2008).

Las especies de escarabajos de la madera pueden ocasionar daños extensos en los objetos de un museo. Pero debido a su lento desarrollo (usualmente de años, salvo en el caso de la especie *Lyctus*), la infestación puede pasarse por alto durante muchos años, incluso décadas. La mayor parte de las veces, las larvas de los escarabajos de la madera son transportadas con objetos infestados en la colección del museo (Nevin *et al.*, 2018). Para muchas especies, regular la humedad es a menudo un método efectivo para detener o ralentizar el desarrollo, si bien este método tiene sus limitaciones en el entorno mediterráneo.



Imagen 9. Insecto adulto (izquierda) y larva (derecha) del escarabajo del reloj de la muerte (*Xestobium rufovillosum*). Fuente: collectionstrust.org.uk

Los ataques de termitas son más comunes en estructuras de madera de edificios históricos que en obras de arte, pero también hay casos de ataques en estas últimas (esculturas, altares, retablos, etc.), como muestra la imagen siguiente. Asimismo, pueden sufrir ataques de termita puertas, ventanas, suelos, revestimientos y casetones de carácter patrimonial.

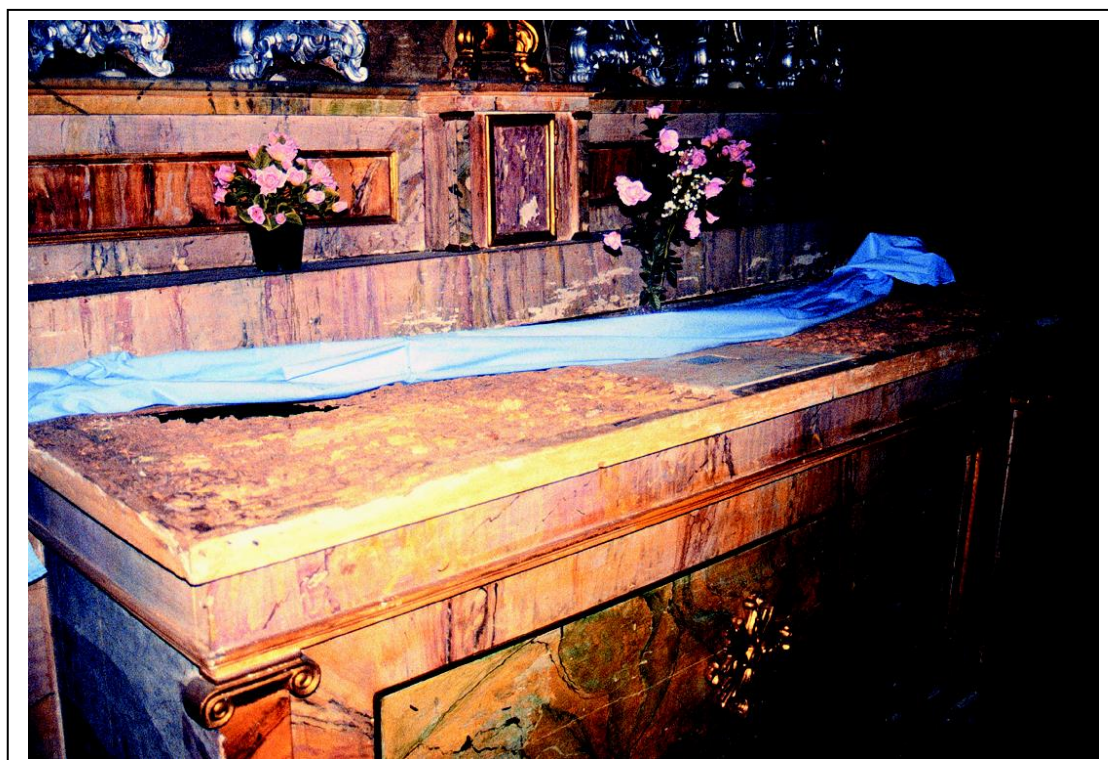


Imagen 10. Altar de una iglesia histórica del norte de Italia que ha sufrido grandes daños por termitas. A pesar de que la iglesia ha sido tratada con insecticidas líquidos durante años, la infestación continuó. Fuente: Su et al. 2003

Pocos museos en Europa usan regularmente pesticidas contra las infestaciones de insectos de la madera, debido a las prohibiciones sobre el uso de sustancias como el DDT, el bromuro de metilo o el ácido cianhídrico. Las fumigaciones de piretroides son poco efectivas, pues no matan a los insectos dentro de las obras de arte o de otros objetos (puertas, ventanas, frisos, etc.). A veces se aplica CO₂, que no daña los objetos. Las atmósferas bajas en oxígeno se consiguen mediante nitrógeno u argón; para cuadros, tallas y estatuas de pequeño o mediano tamaño pueden usarse tratamientos de anoxia con eliminadores de oxígeno en bolsas pequeñas (Nevin *et al.* 2018).

Existen métodos no químicos de tratamiento de obras de arte infectadas como los métodos físicos de congelación (Florian 1990; Berzolla *et al.* 2011), calentamiento controlado (Strang 1992; Pinniger 2003), irradiación por microondas (Unger *et al.* 2008) o irradiación por rayos gamma. Pero no todas las obras pueden ser tratadas con este material, especialmente cuando la madera se usa en combinación con otros materiales. Para la carcoma común se están desarrollando tratamientos biológicos basados en avispas parasitoides (Schöller and Prozell 2011; Auer and Kassel 2014). Estos métodos parecen efectivos, con la información disponible hasta el momento, si se conoce la localización de la infestación y se puede disponer comercialmente de avispas parasitoides (*Parasítica*).

Ninguno de los tratamientos expuestos para la madera de obras de arte en museos y edificios históricos resulta perfecto o eficaz en todas las situaciones; por lo tanto, **siempre resulta recomendable monitorizar la madera de forma preventiva**. El mejor método aplicable debe seleccionarse dependiendo del tiempo disponible (la duración va desde 24 horas en el caso del calentamiento controlado a 5 semanas en el caso de atmósfera de nitrógeno), los recursos económicos, el tipo de infestación y la disponibilidad de las sustancias con que se trata.

En el caso de monumentos o esculturas al aire libre, hay que tener en cuenta que la inyección en el suelo de grandes cantidades de insecticida líquido puede contaminar el hábitat terrestre o el acuático, si el monumento o escultura se encuentra cerca de un río, lago o puerto (Pearce 1997; Nevin *et al.* 2018).



Imagen 11. El pedestal de la estatua de la Libertad, que alberga el museo y habitaciones de servicio, sufrió en la década de 1990 una grave infestación de termitas en la madera. Debido al temprano tratamiento, solamente resultaron afectadas las vitrinas de madera del museo, y no los objetos valiosos y documentos históricos que contenían. En los casos en los que los monumentos están ubicados cerca de puertos, no es posible inyectar en el suelo grandes cantidades de insecticida líquido, porque se contaminaría el hábitat marino. Fuente de la imagen: Wikipedia

3.1.4. Selección de las variables de interés para prevenir y detectar la biodegradación de la madera

Teniendo en cuenta la información analizada en los anteriores apartados de esta tarea, se concluye que las variables de interés para prevenir y detectar la biodegradación de la madera tanto en estructuras como en obras de arte son las siguientes:

- **Humedad de la madera.** Contenidos en humedad superiores al 18% hacen que la madera sea susceptible al ataque de insectos xilófagos, hongos cromógenos y hongos de pudrición. Por otra parte, contenidos elevados durante períodos extensos (semanas, meses) debilitan fuertemente su resistencia mecánica y aumentan su deformación ante cargas permanentes (fluencia), lo que en ocasiones produce hundimientos de forjados y cubiertas.
- **Presencia de movimientos dentro de la madera.** Estos corresponden necesariamente a insectos xilófagos (termitas, anóbidos, líctidos, cerambícidos, etc.).

Tarea 3.2: Investigación y análisis de los métodos y sistemas actuales para detectar y monitorizar la biodegradación de la madera en obras de arte y estructuras

3.2.1. Métodos y sistemas actuales para detectar y monitorizar la biodegradación de la madera en obras de arte y estructuras

Ni los edificios históricos de madera ni las obras de arte que incluyen madera como material pueden evaluarse ni monitorizarse mediante técnicas de evaluación destructiva. Cualquier enfoque para detectar la biodegradación de la madera en edificios u obras de arte debe centrarse en la **evaluación no destructiva**.

Por definición (Pellerin and Ross 2002), la evaluación no destructiva es la ciencia de caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de un trozo de material sin alterar sus capacidades, y entonces se usa esta información para tomar decisiones sobre los tratamientos apropiados o las acciones de preservación. Estas evaluaciones se basan en tecnologías no destructivas de ensayos para proporcionar información precisa relativa a las propiedades, el rendimiento o la condición del material en cuestión. Los resultados de los ensayos no destructivos pueden relacionarse con el estado interno de la madera y dar información precisa sobre su biodegradación.

Muchos ensayos o técnicas pueden clasificarse como no destructivos: inspección visual (color, presencia de defectos); ensayos químicos (composición, presencia de tratamientos); ensayos físicos (resistencia térmica, propiedades dieléctricas, propiedades vibratorias, propagación de ondas a través del medio, emisiones acústicas, rayos gamma, rayos X); y ensayos mecánicos (pruebas de carga, sondas).

Algunos de estos ensayos o técnicas se aceptan industrialmente de forma amplia. Por ejemplo, la evaluación de características visuales de una pieza de madera es probablemente una de las técnicas no destructivas más usadas en la industria de productos de la madera (aserraderos, fabricantes de tableros derivados, de madera laminada o contralaminada, etc.). Características como el tamaño, el número y la ubicación de nudos son características visuales que se consideran cuando se clasifica madera tanto estructural como no estructural. Sin embargo, solamente unos pocos de esos ensayos y técnicas son adecuados para evaluar o monitorizar *in situ* obras de arte o estructuras de madera.

La inspección visual es el procedimiento habitual para evaluar el nivel de biodegradación tanto en estructuras de madera como en obras de arte. Sin embargo, la detección de la actividad de las termitas u otros insectos xilófagos por inspecciones visuales rutinarias debe considerarse un método poco fiable (French *et al.* 2010). Otros métodos de detección se basan en sistemas de cebos y tecnologías acústicas (Pearce 1997).

Los sistemas de cebos se aplican solamente a termitas y son eficaces para los tratamientos contra éstas, pero los cebos necesitan abrirse para controlar y monitorizar la actividad de las termitas. Esto representa un elevado coste en logística. Normalmente, las estaciones o cebos de monitorización son similares a las descritas en Su and Scheffrahn 1986, y miden la actividad de las termitas en algunos puntos del terreno o el edificio (no dentro de la madera).

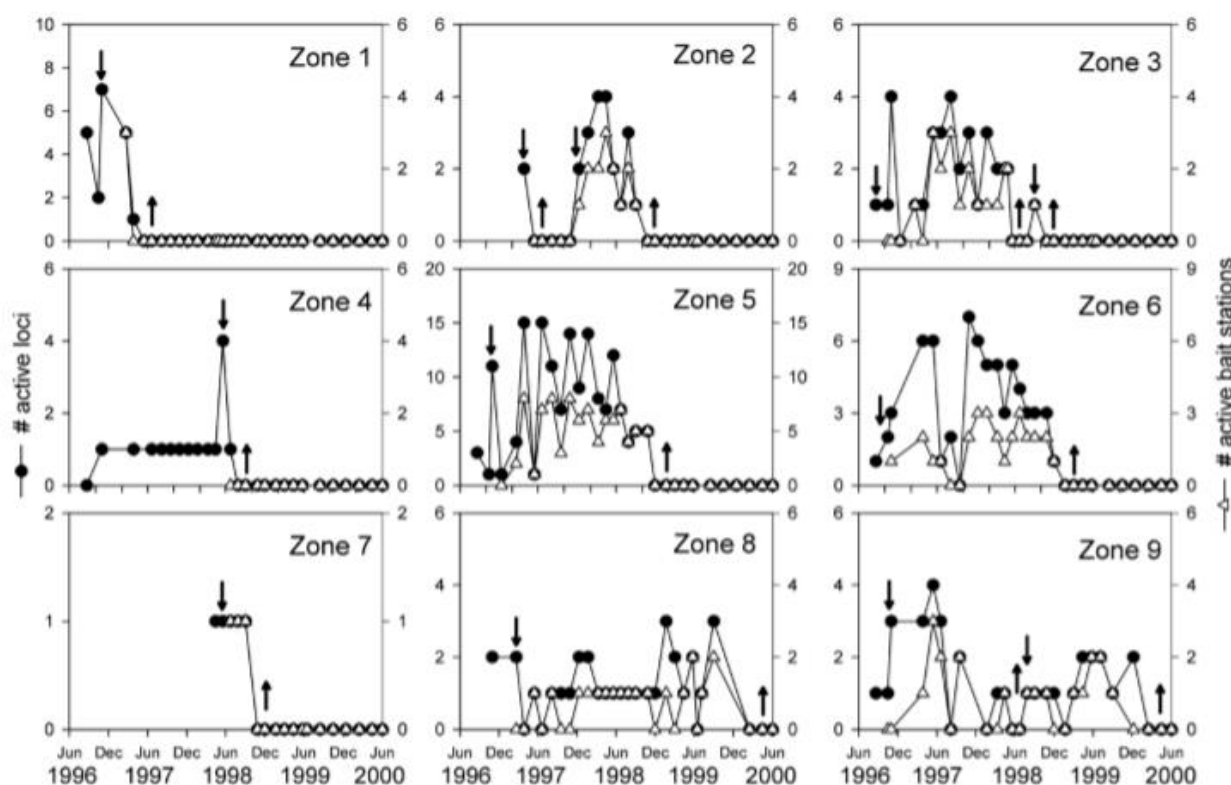


Imagen 12. Actividades de termitas, expresadas por el número de puntos donde están activas (círculos) y el número de estaciones/cebos con termitas vivas (triángulos abiertos) para 9 zonas de poblaciones de termitas *Heterotermes* sp. en Fort Christiansvaern, Christiansted National Historic Site. Fuente: Su *et al.* 2003

Si bien los sistemas de estaciones o cebos son muy adecuados para cuantificar la intensidad de los ataques de termitas y su alcance, no resultan adecuados para usarse dentro de la madera, y en ningún caso en obras de arte.

Los dispositivos acústicos son útiles para la detección *in situ* de termitas y otros insectos xilófagos en fase de larva (principalmente, en el área mediterránea, anóbidos, líctidos y cerambícidos), pero no son apropiados para usarse en monitorizaciones permanentes, debido a las interferencias del espectro de ultrasonidos de la actividad de las termitas (Mora *et al.* 2009). Por otra parte, los dispositivos acústicos, por su reducido alcance, detectan solamente insectos en zonas muy próximas a donde se colocan sus amplificadores. En el caso de anóbidos, líctidos y cerambícidos, la efectividad de dichos dispositivos resulta muy reducida, pues a diferencia de las termitas no son insectos sociales y el ataque puede estar localizado únicamente en elementos de difícil acceso.

Existen numerosas patentes para la detección y control de termitas mediante cebos (por ejemplo, US6416752, EP0069879, US6857223 y WO2006088653); pero en la mayoría de ellas la innovación tiene que ver con el insecticida usado o con el diseño del contenedor del cebo (pensado para ser instalado en la tierra o el suelo), no con la monitorización de termitas dentro de la madera.

El sistema descrito en la patente US5815090 se refiere a un sistema remoto de monitorización para detectar termitas, por medio de un sistema que incluye diferentes dispositivos (entre ellos, estaciones de monitorización) para recoger datos que se envían a un procesador central para la detección de plagas. La detección se lleva a

cabo cuando la termita muerde un conductor eléctrico. Este sistema no detecta otros insectos xilófagos ni tampoco hongos xilófagos; además, la detección de termitas no es rápida, pues la primera cosa que las termitas muerden es la madera y no el cable, así que éste puede ser cortado por ellas cuando la madera se encuentre ya debilitada y el ataque ocupe una zona amplia. Por último, la forma y sobre todo el volumen de las estaciones de monitorización son apropiados para colocarlas en el suelo, pero no dentro de la madera, ni en madera estructural ni en obras de arte.

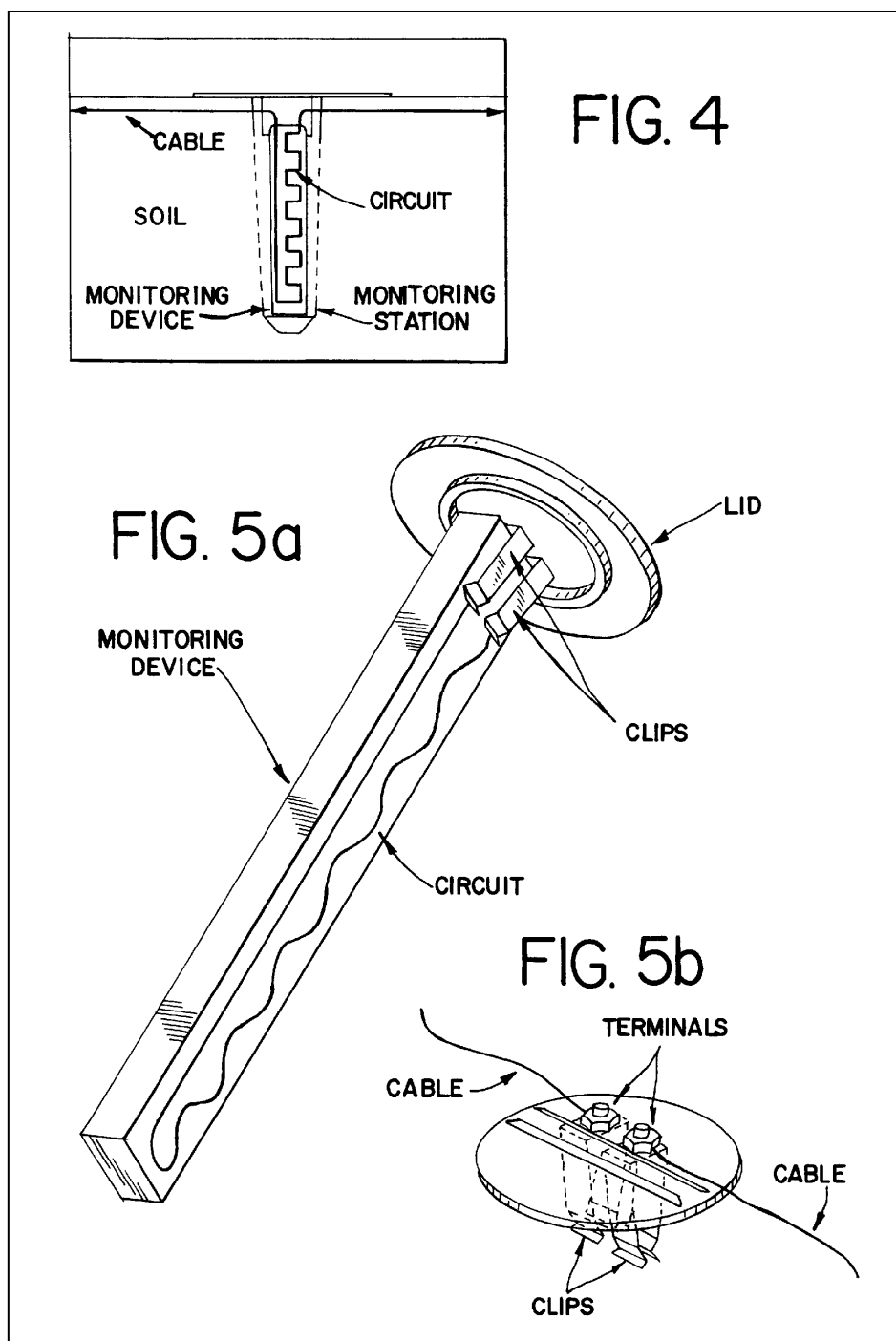


Imagen 13. Estación de monitorización de termitas propuesto por la patente estadounidense US5815090. Esta estación puede instalarse en la tierra, pero por forma y volumen no es apropiada para madera estructural ni obras de arte. Además, las termitas deben morder el cable para que el sistema las detecte.

La patente EP 0283142 (imagen 14) describe un dispositivo que incluye un número de detectores distribuidos en un área bajo vigilancia y conectada a un indicador que señala el estado de ese detector, y que tampoco permite la detección de anóbidos, líctidos y cerambícidos, ni de hongos xilófagos; solamente la de termitas.

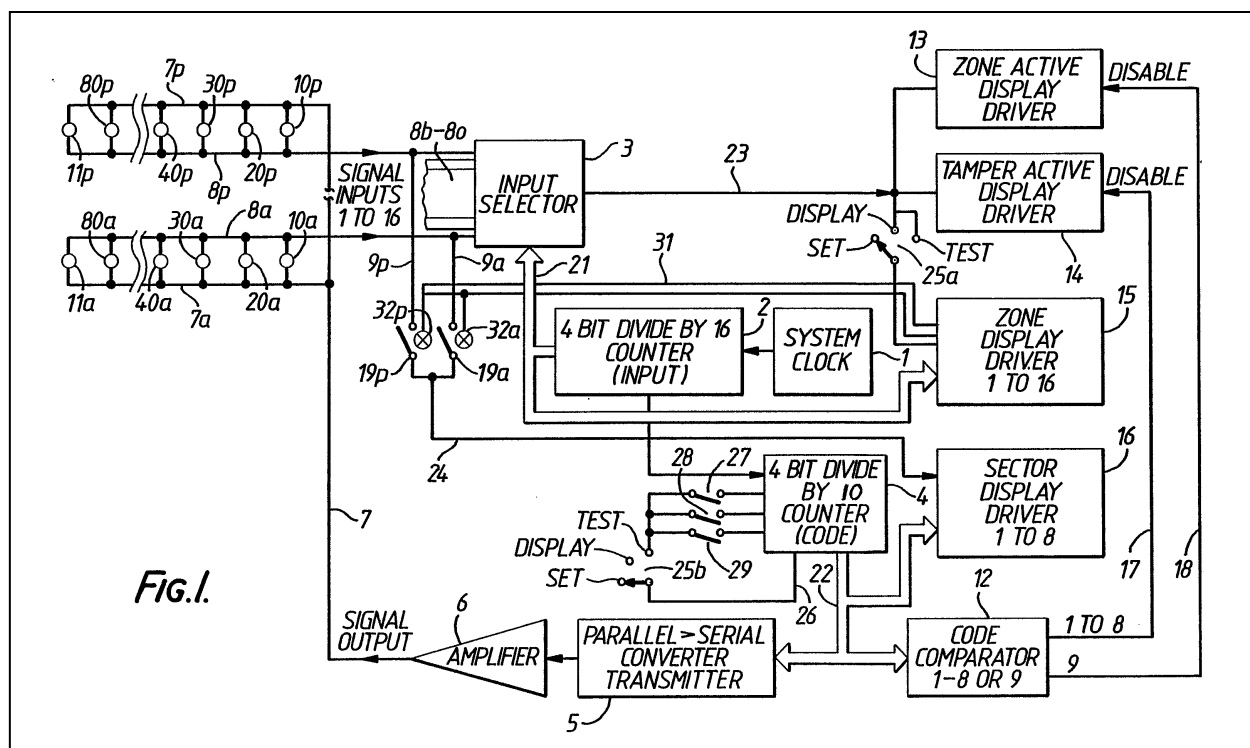


Imagen 14. Diagrama esquemático de bloques de un dispositivo para monitorizar la actividad de termitas (EP 0283142). Está compuesto por un indicador central y un número variable de detectores.

La compañía GE Measurement & Control Solutions desarrolló un sistema llamado Protimeter HygroTrac, que proporciona sistemas de monitorización inteligente que combinan redes de sensores inalámbricos y un sitio web en el que se informa de la monitorización de parámetros ambientales como humedad, temperatura y contenido en humedad de la madera, parámetros que influyen en la integridad de sistemas de edificios e instalaciones críticas.

Los sensores inalámbricos HygroTrac (imagen 15) se sitúan en un edificio y las lecturas se envían a una pasarela de adquisición de datos. Esta pasarela está conectada a un servidor web seguro y dedicado al sistema por medio de Ethernet o de una línea telefónica. Las medidas pueden consultarse por Internet. El principal problema de esta solución es que fue diseñada para dar avisos precoces de posibles problemas de humedad en edificios (por ejemplo, fugas de agua en tuberías), y no puede detectar insectos xilófagos de ninguna forma, ni siquiera termitas. Por lo tanto, los sensores inalámbricos HygroTrac no son aptos para monitorizar ni edificios históricos de madera ni obras de arte.



Imagen 15. Sensores inalámbricos HygroTrac. Fuente: <http://www.gehygrotrac.com/>

La Universidad Edith Cowan del oeste de Australia desarrolló sensores inalámbricos acústicos para la detección de plagas en la madera. Su sistema (imágenes 16, 17 y 18), llamado WiSPr (red para detección acústica "Wireless Smart Probe"), consiste en un diminuto sensor más pequeño que una uña y que va fijado a la madera alrededor de una casa o que puede instalarse posteriormente en estaciones de termitas ya existentes. Continuamente capta sonidos intentando detectar la firma acústica de las termitas masticando.

Además del problema de las interferencias en el espectro de ultrasonidos de la actividad termítica, estos sensores necesitan un PC o un ordenador portátil donde se ejecuten algoritmos de detección para evaluar si los sonidos captados pertenecen o no a termitas. No pueden detectar ni biodegradación fúngica ni medir la humedad de la madera. Asimismo, pueden detectar solamente termitas, no otros tipos de insectos xilófagos. Por lo tanto, no son útiles para monitorizar edificios históricos de madera ni obras de arte.

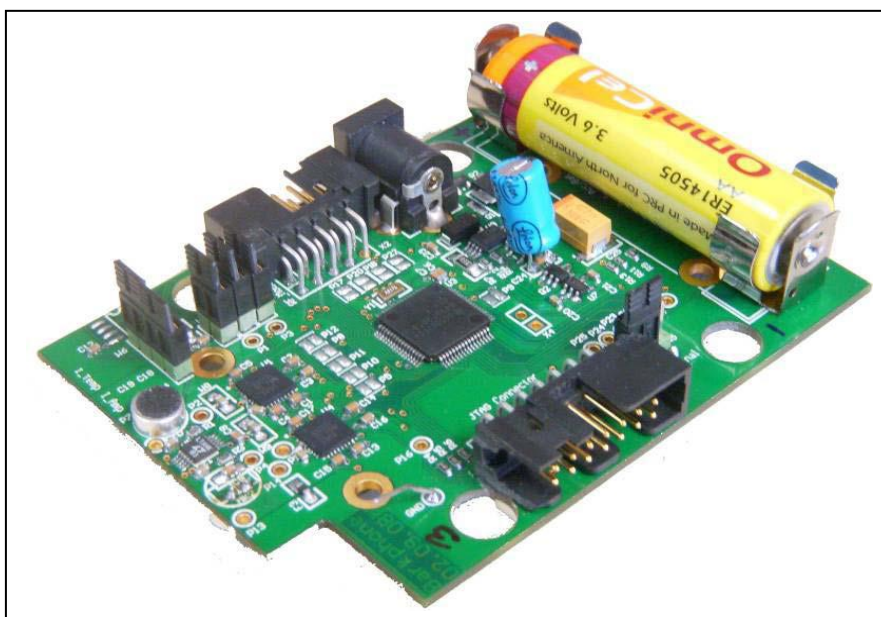


Imagen 16. Nodo WiSPr. Fuente: <http://ro.ecu.edu.au/>

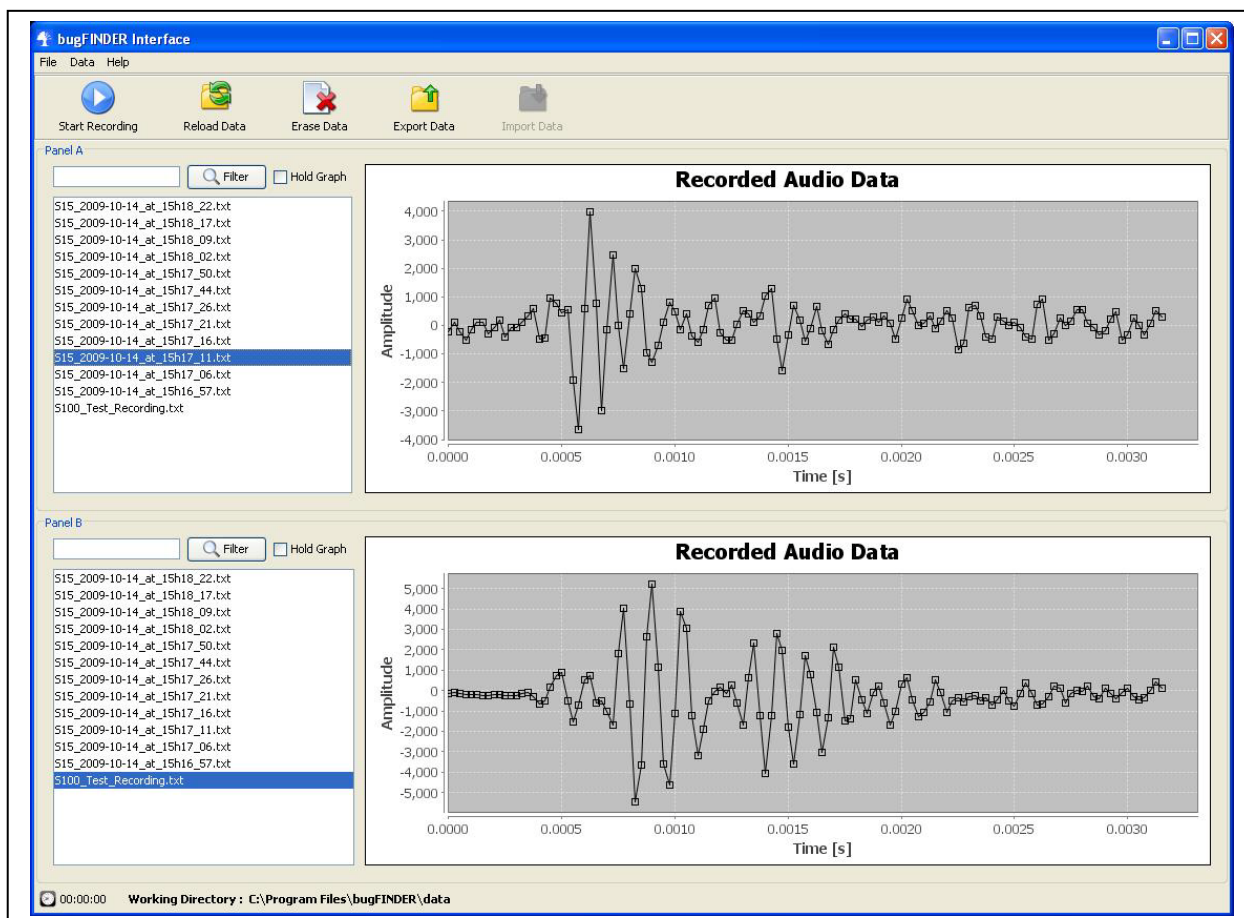


Imagen 17. Software WiSpr basado en algoritmos de detección, que debe ejecutarse en un PC o en un ordenador portátil. Fuente: <http://ro.ecu.edu.au/>



Imagen 18. Uso del sistema WiSpr. Fuente: <http://ro.ecu.edu.au/>

Recientemente hay al menos una experiencia de aplicación de técnicas de Inteligencia Artificial para la detección acústica de larvas de insectos xilófagos dentro de la madera (Bilski *et al.* 2017). En esta investigación se empleó una SVM (*Support Vector Machine*) para determinar automáticamente la presencia de insectos dentro de la madera.

Para verificar la efectividad del método se usaron casi 200 grabaciones de sonidos de insectos. La precisión en la detección fue próxima al 90%, si bien las pruebas se realizaron en condiciones de laboratorio y por tanto no tienen en cuenta el ruido ambiente que suele estar presente en edificios y museos (procedente de conservaciones, pasos, de máquinas y de equipos de calefacción o de aire acondicionado, del tráfico, etc.).

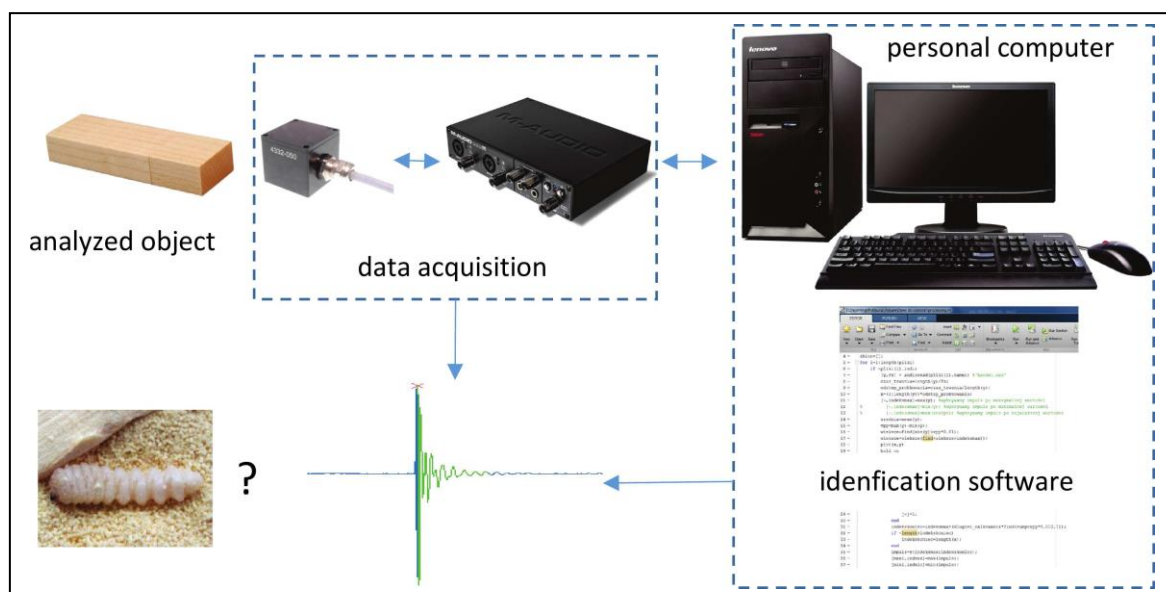


Imagen 19. Esquema del sistema de detección de los insectos dentro de la madera. El software de identificación de insectos usa algoritmos de IA. Fuente: Bilski *et al.* 2017

Al igual que sucede con WiSPR, el sistema de Bilski *et al.* 2017 necesita un PC o un ordenador portátil donde se ejecuten los algoritmos de IA que determinan si los sonidos captados pertenecen o no a insectos y a qué tipo. Como no detecta la biodegradación fúngica ni determinan la humedad de la madera, no es apropiado para monitorizar edificios históricos de madera ni obras de arte.

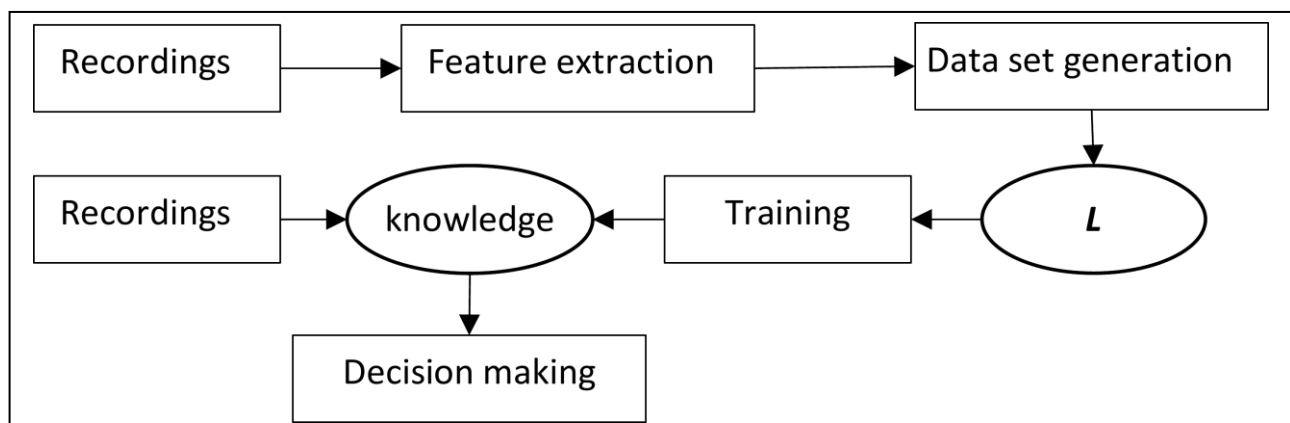


Imagen 20. Esquema de la detección de insectos en la madera basado en técnicas de Inteligencia Artificial. Fuente: Bilski *et al.* 2017

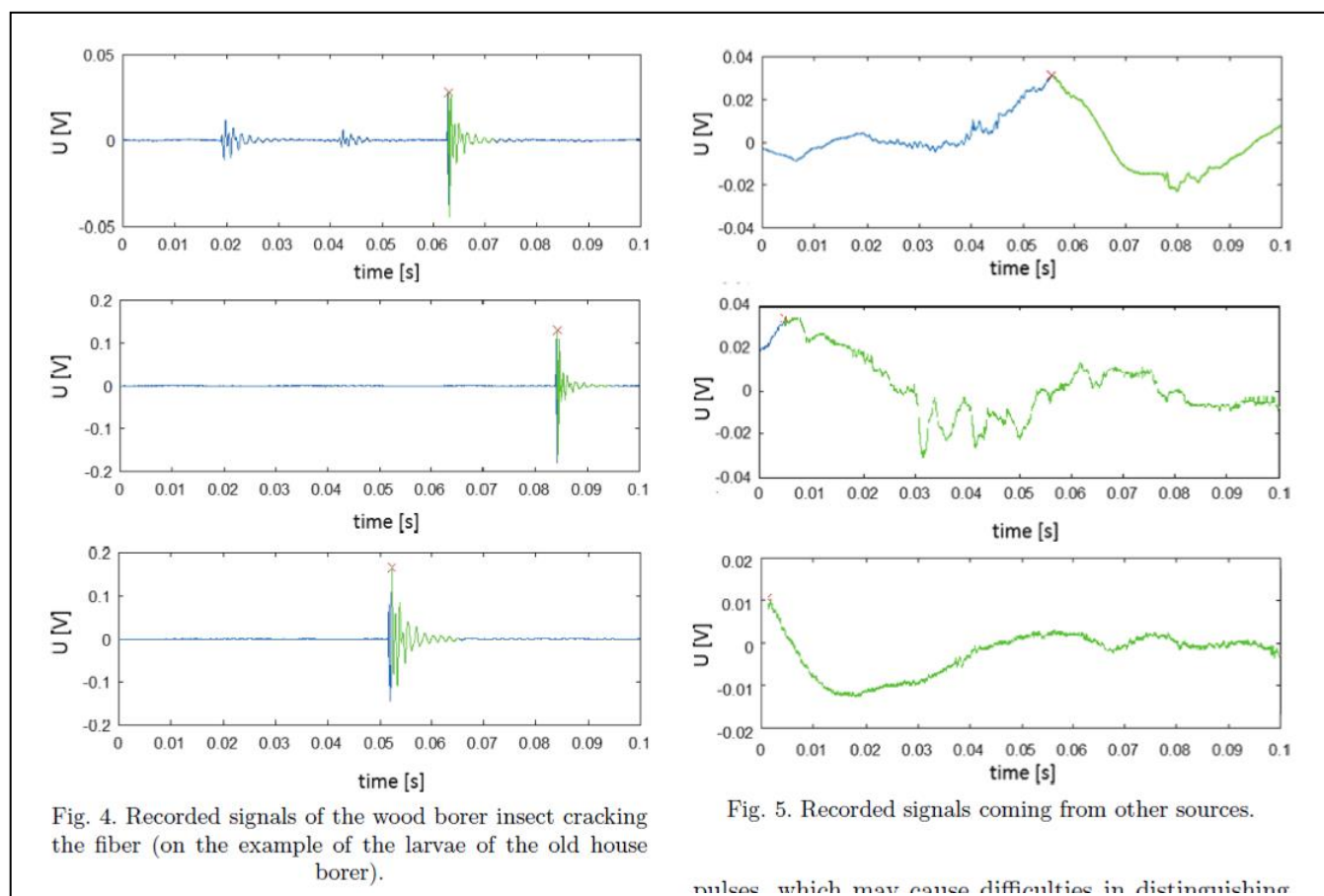


Imagen 21. Sonidos grabados de larvas de insectos dentro de la madera (izquierda) y de sonidos procedentes de otras fuentes (derecha). Fuente: Bilski et al. 2017

Existe un dispositivo comercial, llamado Termatrac, que para detectar insectos dentro de la madera se basa en el efecto de Doppler de ondas de microondas. Las versiones anteriores del aparato (la actual es la Termatrac T3i) presentaban un número elevado de falsos negativos (no indicaba detección de termitas cuando en realidad estaban presentes, en ocasiones en gran número), como se explica en (Evans 2002), por lo que el aparato no se ha usado mucho en la industria de plagas y tratamientos.

En (Taravati 2018) se evalúa la versión actual del dispositivo con termitas de madera seca (*Isoptera: Kalotermitidae*) en muros, y se llega a la conclusión de que la máxima profundidad fiable de la madera para detectar termitas es de 5 cm, que es una profundidad pequeña para evaluar vigas y cerchas en estructuras, si bien podría usarse en obras de arte.



Imagen 22. Equipo Termatrac T3i. Fuente: <https://termatrac.com/>

Las seis imágenes siguientes muestran la señal detectada por el equipo Termatrac para 25 termitas obreras colocado directamente sobre ellas y con piezas de abeto de distintos espesores entre el equipo y las termitas. Como puede apreciarse, para un espesor de 18 mm, que es pequeño en comparación con el espesor de la mayoría de vigas, viguetas y cerchas, la señal es débil y apenas se distingue del ruido. Para 27 mm en adelante, la señal es casi imperceptible o nula.

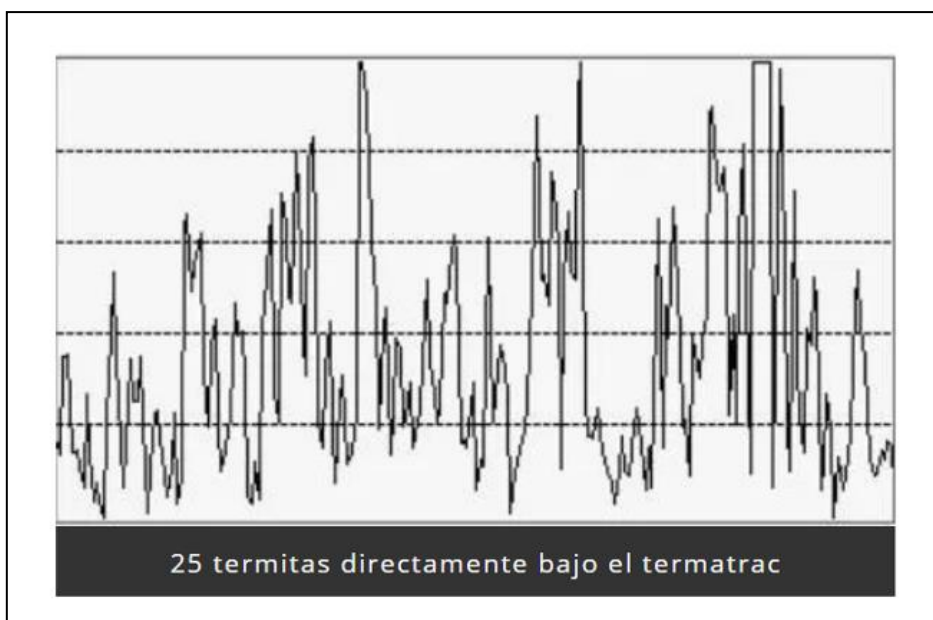


Imagen 23. Gráfica proporcionada por el equipo Termatrac cuando se colocan directamente bajo él 25 termitas. Fuente: <http://www.expertoentermitas.org/termatrac-detector-de-termitas-por-movimiento/>

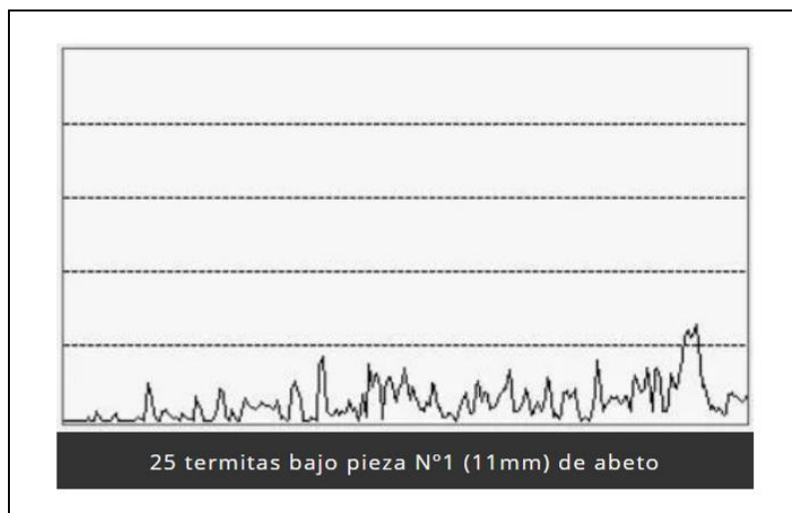


Imagen 24. Gráfica proporcionada por el equipo Termatrac cuando se colocan 25 termitas debajo de una pieza de 11 mm de espesor de abeto (el equipo en contacto con la cara superior de la pieza). Fuente: <http://www.expertoentermitas.org/termatrac-detector-de-termitas-por-movimiento/>

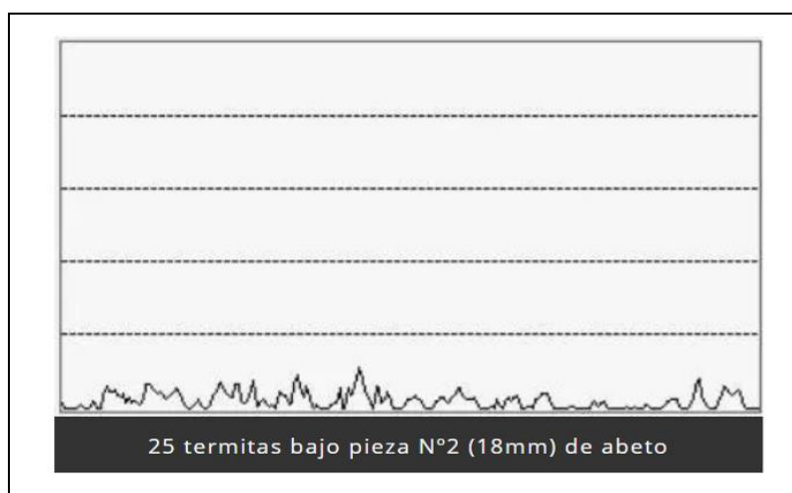


Imagen 25. Gráfica proporcionada por el equipo Termatrac cuando se colocan 25 termitas debajo de una pieza de 18 mm de espesor de abeto (el equipo en contacto con la cara superior de la pieza). La señal es débil y apenas distinguible del ruido. Fuente: <http://www.expertoentermitas.org/termatrac-detector-de-termitas-por-movimiento/>

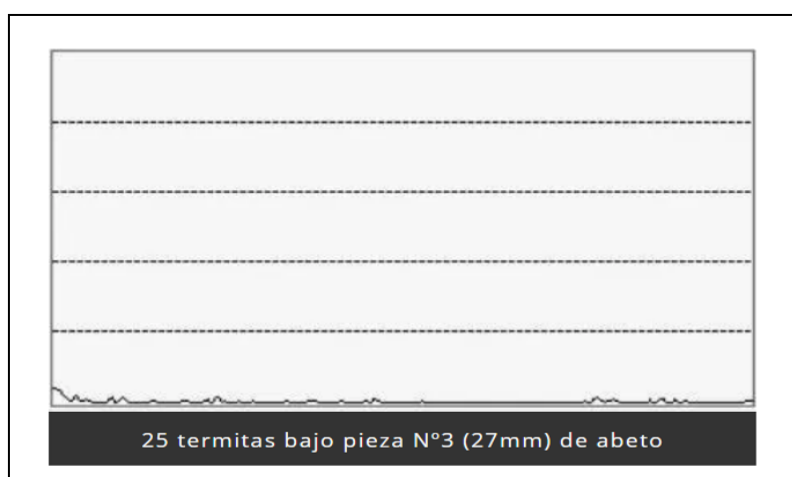


Imagen 26. Gráfica proporcionada por el equipo Termatrac cuando se colocan 25 termitas debajo de una pieza de 27 mm de espesor de abeto (el equipo en contacto con la cara superior de la pieza). La señal es casi imperceptible. Fuente: <http://www.expertoentermitas.org/termatrac-detector-de-termitas-por-movimiento/>

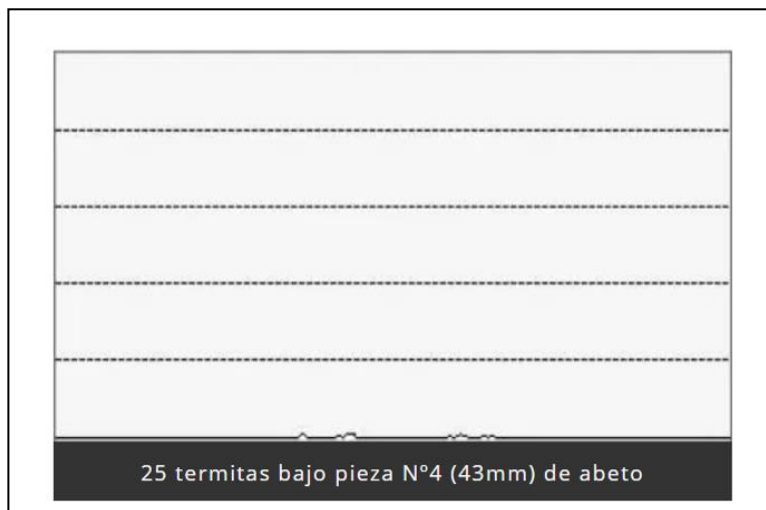


Imagen 27. Gráfica proporcionada por el equipo Termatrac cuando se colocan 25 termitas debajo de una pieza de 43 mm de espesor de abeto (el equipo en contacto con la cara superior de la pieza). La señal es casi por completo imperceptible. Fuente: <http://www.expertoentermitas.org/termatrac-detector-de-termitas-por-movimiento/>

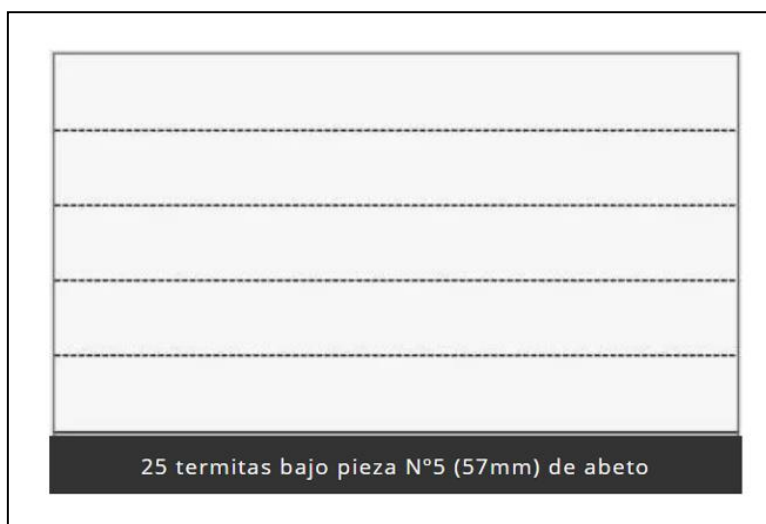
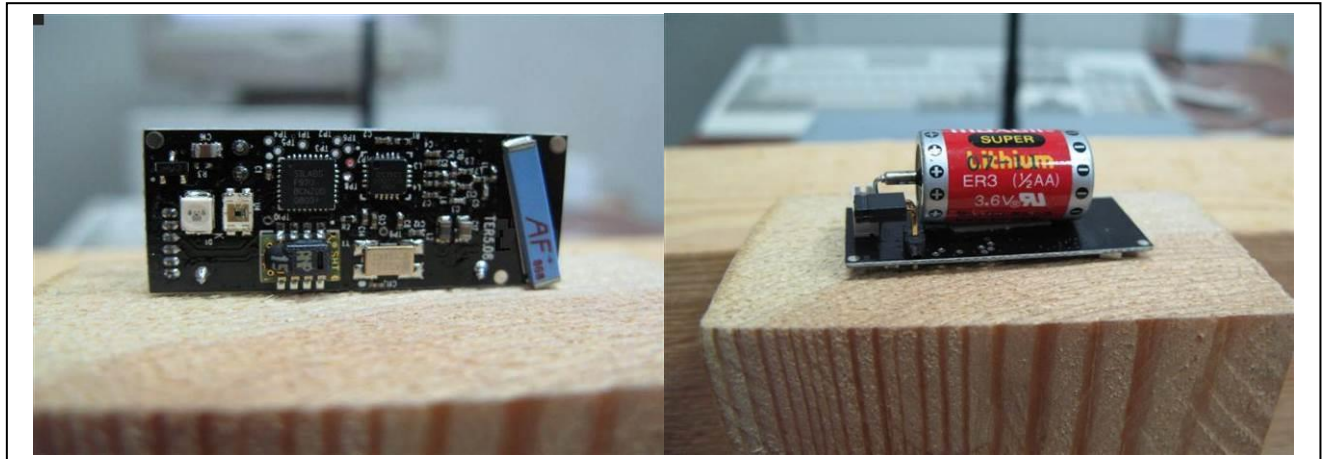


Imagen 28. Gráfica proporcionada por el equipo Termatrac cuando se colocan 25 termitas debajo de una pieza de 57 mm de espesor de abeto (el equipo en contacto con la cara superior de la pieza). No hay señal. Fuente: <http://www.expertoentermitas.org/termatrac-detector-de-termitas-por-movimiento/>

Los resultados publicados sobre Termatrac T3i corresponden solamente a termitas, y no hay información sobre si es efectivo para detectar otros insectos xilófagos. Tampoco se ha estudiado cómo influyen en los resultados la presencia de cañizos o de revoltón delante de la madera, situación muy común en la construcción tradicional valenciana. Por último, el dispositivo requiere intervención humana tanto para su uso como para la interpretación de resultados, y no sería fácil automatizarlo para un sistema de monitorización.

AIDIMA (actualmente AIDIMME) desarrolló entre 2006 y 2008, un sistema de monitorización de la madera en el marco de proyecto “INVESTIGACIÓN SOBRE MODELOS BIOFÍSICOS PARA LA DETECCIÓN DE LA BIODEGRADACIÓN DE LA MADERA”, financiado por el **IMPIVA** (actualmente **IVACE**) y por fondos **FEDER**.

Este sistema, llamado CADIX, monitoriza mediante sensores inalámbricos la humedad de la madera y la presencia de insectos xilófagos, sin intervención humana.



Imágenes 29 y 30. El sensor inalámbrico CADIX. Fuente: AIDIMME



Imagen 31. Inserción del sensor final en la madera. El sensor está dentro de una carcasa abierta de madera pintada de negro para permitir la reflexión de luz y la entrada de termitas. Fuente: AIDIMME

4. SELECCIÓN Y MEJORA DEL SISTEMA MÁS ADECUADO PARA DETECTAR Y MONITORIZAR LA BIODEGRADACIÓN DE LA MADERA EN OBRAS DE ARTE Y ESTRUCTURAS

Tarea 4.1: Selección del sistema más adecuado para detectar y monitorizar la biodegradación de la madera

Analizados los sistemas y métodos analizados en el PT1, se considera que el sistema CADIX resulta el más adecuado para detectar y monitorizar la biodegradación de la madera por los siguientes motivos:

- a) El sistema es completamente automático e inalámbrico y monitoriza continuamente la humedad interna de la madera y la existencia de movimientos en su interior. Por tanto puede detectar cualquier insecto xilófago (termitas, anóbidos, líctidos, cerambícidos, etc.).
- b) Puede detectar riesgos para la degradación por hongos porque relaciona las condiciones de la madera (contenido en humedad y temperatura) con las condiciones de pudrición.
- c) A diferencia de otros sistemas, este no basa la detección de insectos xilófagos en que los insectos tengan que comer en cebos madera o celulosa.
- d) Ha sido probado durante 6 años con resultados exitosos, tanto en laboratorio como en edificios (el archivo de la catedral de Valencia, por ejemplo).
- e) Permite la futura integración adicional de otros sensores (por ejemplo fisurómetros o galgas extensiométricas).
- f) El sensor carece de partes móviles. Es pequeño y compacto, así como sencillo de instalar y mantener.
- g) La radiación del emisor LED, al estar parcialmente en la zona de infrarrojos, es considerada por las termitas como una fuente de calor, y por lo tanto como un peligro. Por este motivo, si están presentes en un elemento de madera, las atrae desde cualquier parte del elemento.

Sin embargo, el sistema CADIX presenta los siguientes problemas e inconvenientes, la mayoría derivados de la evolución de la tecnología en el tiempo transcurrido desde que se desarrolló:

- a) Los sensores son pequeños, pero pueden reducir la resistencia mecánica de elementos estructurales de pequeña sección, dado que van insertados completamente en el elemento. Para obras de arte, también sería necesario que fueran bastante más pequeños.
- b) El consumo energético de los componentes electrónicos del sensor es medio-alto comparado con el consumo de algunos componentes similares actuales. Esto ocasiona que haya que cambiar las pilas con cierta frecuencia (6-8 meses).
- c) El cambio de la pila requiere herramienta (alicates y después soldadura) y obliga a sacar el sensor del elemento de madera donde está insertado, lo que en ocasiones es difícil y requiere medios de acceso (escaleras, andamios, elevadores).

- d) El sistema se basa en comunicaciones al sumidero/estación base mediante red GSM/2G (que implementa el servicio de mensajes cortos de texto o SMS), y no es compatible con 3G/4G o Wifi, ni con el futuro 5G, ya en pruebas.
Esta limitación reduce la cantidad de información que puede transmitirse al sumidero (la que cabe en un mensaje SMS) e imposibilita el uso o compatibilidad con las redes actuales de comunicaciones. Posiblemente la red GSM desaparecerá en los próximos años, y el sistema actual será inservible.
- e) Como el sistema no utiliza nodos repetidores de las señales, en un edificio grande o con muchas plantas es necesario usar varias redes independientes, cada una con un nodo central o sumidero. Esto complica la gestión de los datos y aumenta el precio de la instalación del sistema (los nodos repetidores son mucho más baratos que un nodo central, ya que no necesitan microcontroladores ni programación de éstos).
- f) El sistema no es compatible con las normas y protocolos de Smart Cities, algunos de los cuales estaban en desarrollo o aún no existían cuando se diseñó e implementó el sistema.
- g) Falta de escalabilidad: al aumentar el número de sensores y el número de datos transmitidos, el sistema funciona más lentamente y se pierden algunos datos.
- h) La información (mensajes SMS) no se muestra en un *app*.

Tarea 4.2: Propuestas de mejora para el sistema de detección y monitorización de la biodegradación de la madera

4.2.1. Mejora del sensor del sistema

Para disminuir el tamaño del sensor CADIX se propone descomponer el sensor en dos módulos separados y conectados por cable: uno, el de menor tamaño, iría insertado en la madera; el otro, donde estaría la alimentación eléctrica de la primera parte, se encargaría también de la transmisión de los datos por radiofrecuencia.

Para mejorar el sensor CADIX reduciendo el consumo energético de los componentes y aumentando su sensibilidad y precisión se analizaron componentes similares actuales de distintos fabricantes y sus características técnicas (consumo, sensibilidad, compatibilidad, tiempo de respuesta, rango de funcionamiento, estabilidad frente a temperatura y humedad, etc.), y se escogieron los más adecuados.

La alimentación del segundo módulo, que alimenta al primero, sería proporcionada por una pila AA convencional de 3,6 V.

A partir de los consumos energéticos individuales expuestos en fichas técnicas de los fabricantes, se ha calculado que el sensor mejorado tendría un consumo total de aproximadamente 19 mA cuando envía datos y de 24 mA cuando está en funcionamiento sin enviar datos.

4.2.2. Mejora de la arquitectura TIC o de comunicaciones del sistema

Resulta necesario cambiar la arquitectura TIC del sistema CADIX, basada en la red GSM (2G) y no escalable, por una arquitectura actual, escalable, compatible con normas y protocolos de Smart Cities (nodos *Internet of Things* o IoT), con 3G/4G y Wifi, y preparada para la próxima implantación del 5G.

La arquitectura del sistema seguiría una estructura de capas como se muestra en la siguiente imagen.

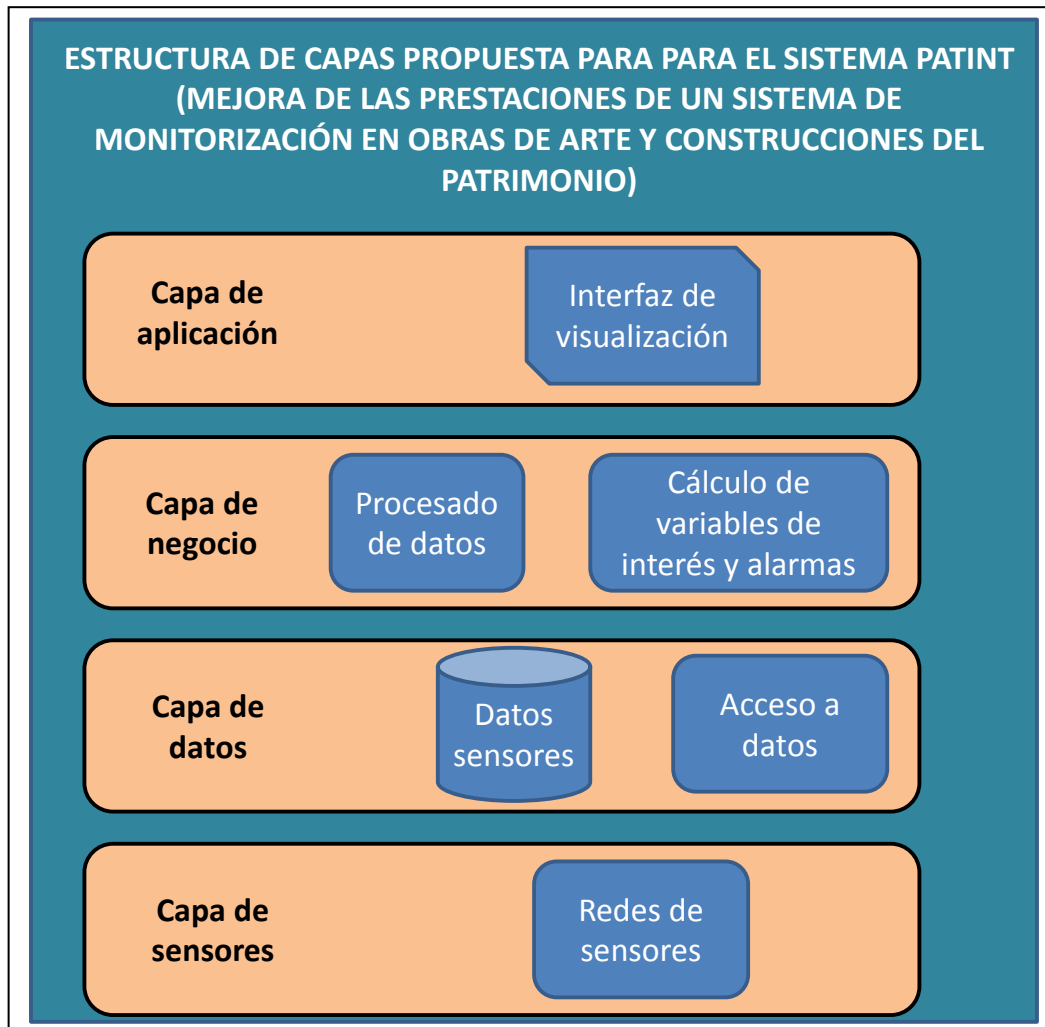


Imagen 32. Capas de la infraestructura TIC propuesta para el sistema mejorado. Fuente: AIDIMME

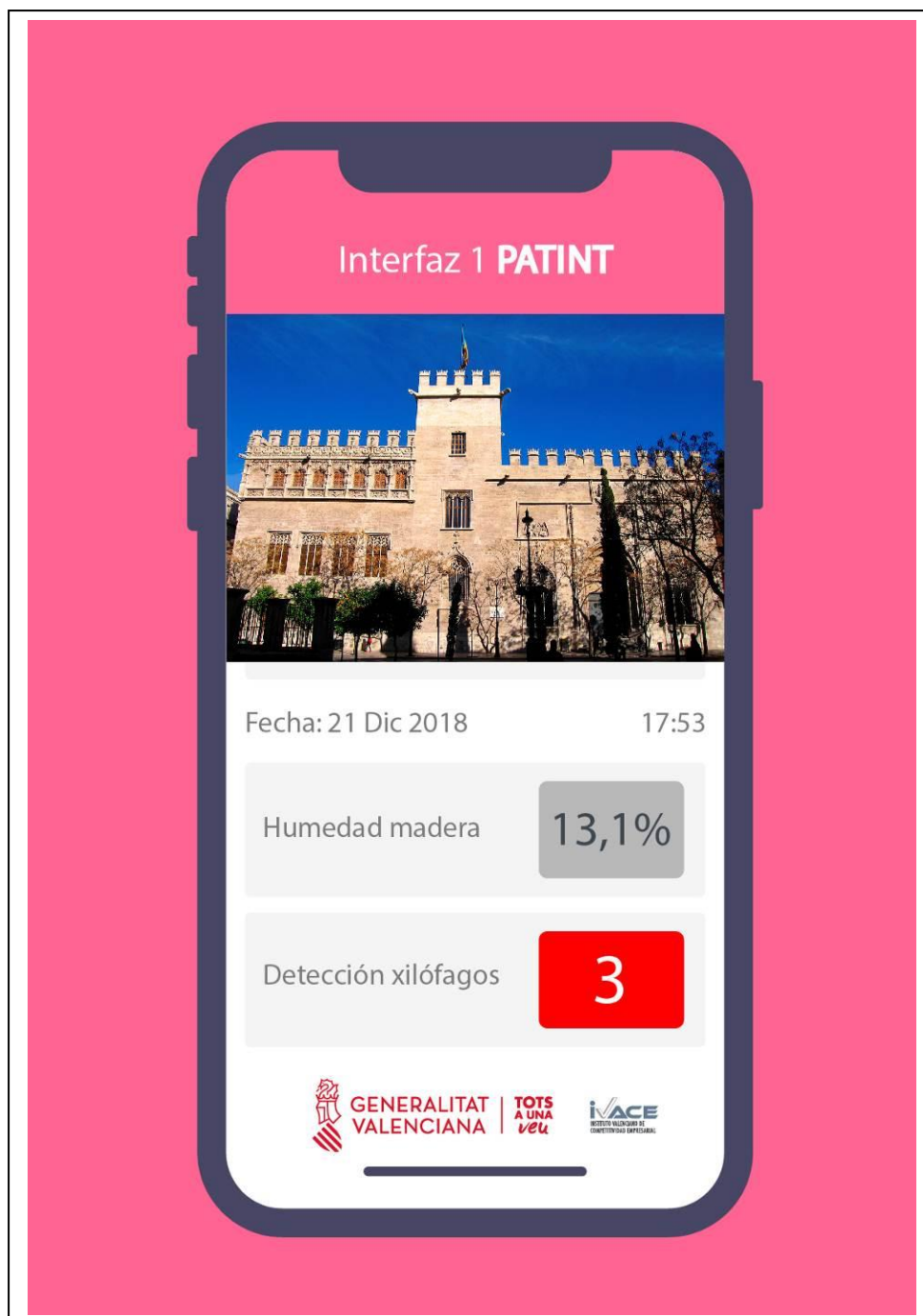


Imagen 33. Ejemplo de la interfaz propuesta para la visualización de datos. El color rojo indica alarma por xilófagos (carcoma, termita, etc.).

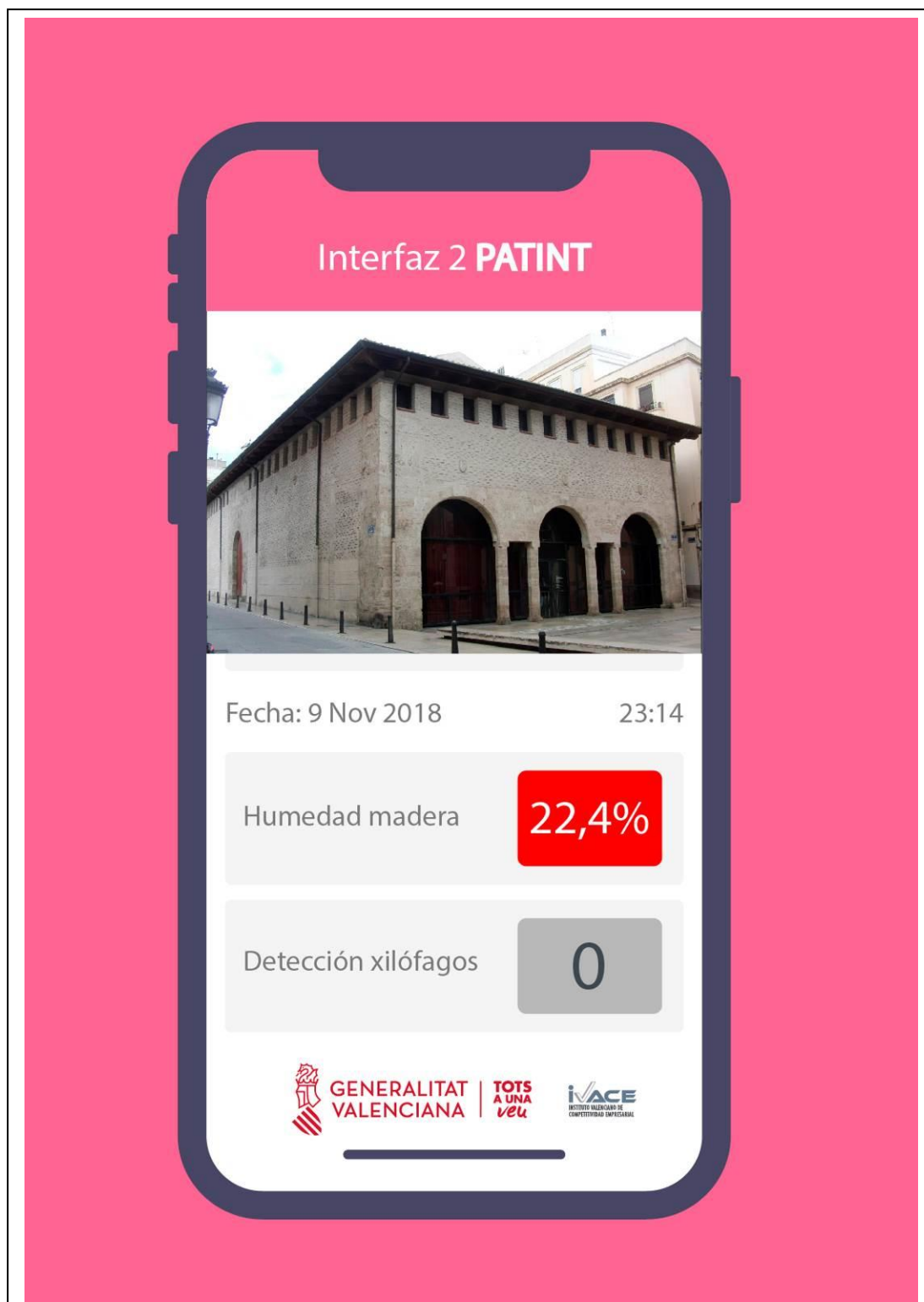


Imagen 34. Ejemplo de la interfaz propuesta para la visualización de datos. El color rojo indica alarma por exceso de humedad de la madera.

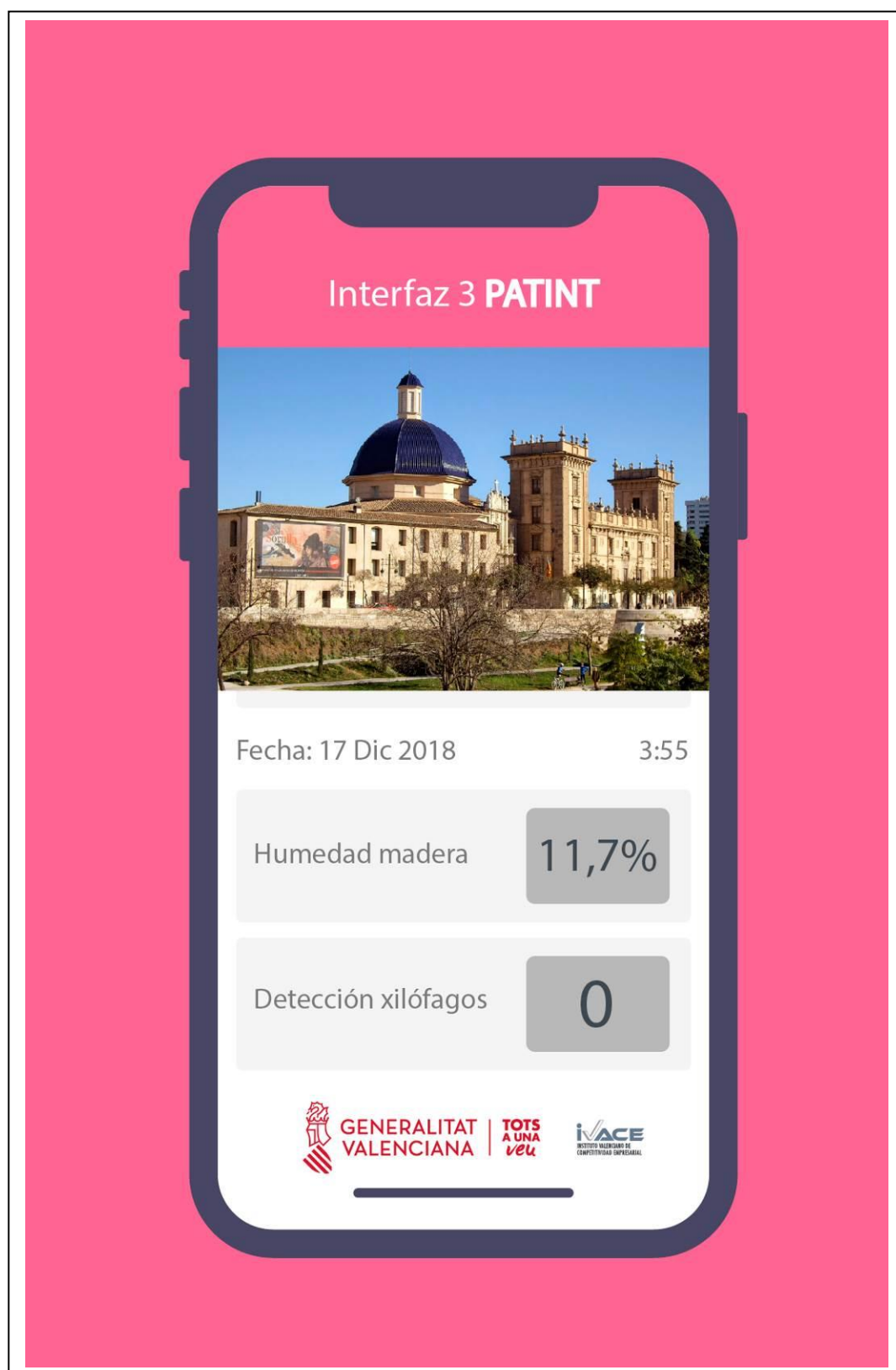


Imagen 35. Ejemplo de la interfaz propuesta para la visualización de datos. En este caso no hay alarmas.