CUADERNOS TÉCNICOS

Investigación sobre el oscurecimiento húmedo que afecta al enlosado de la capilla del Cristo de Santa María de Conxo

Soledad García Morales Raquel Otero Ortiz de Cosca Hugo Allegue Castelos

CONSORCIO DE SANTIAGO

OFICINA TÉCNICA

Este documento forma parte de la colección de "Cuadernos Técnicos de la Oficina Técnica del Consorcio de Santiago"

Gerente: Belén Fernández Lafuente

CUADERNO TÉCNICO:

Autores: Soledad García Morales, Raquel Otero Ortiz de Cosca, Hugo Allegue Castelos.

Coordinación de la publicación: Oficina Técnica del Consorcio de Santiago

Composición de la Oficina Técnica:

Arquitecta directora técnica: Lourdes Pérez Castro

Arquitectos Coordinadores: Idoia Camiruaga Osés; Ramón Fernández Hermida; Ángel Panero Pardo; Pablo Tomé Ferreiro.

Delineantes: José Antonio García Martínez, Luis Gianzo Quintela

Secretaría: Liana Ramos Guallart

Agradecimientos:

D. Manuel Pérez Villar, cura párroco de Nuestra Señora de la Merced de Conxo

ISBN: 978-84-16753-03-1

Depósito Legal: C 1110-2016

Se consiente cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de este documento citando la proveniencia de la información, salvo en las excepciones previstas por la ley.

Contacto: cuadernostecnicos@consorciodesantiago.org

ÍNDICE

Introducción 1

Breve reseña histórica de la Capilla del Cristo. A partir del estudio de Dña. Belén María Castro Fernández. 3

A. Descripción del edificio 7

A.1 Entorno del edificio 7

A.2 Sistemas constructivos 11

A.3 Datos históricos sobre reparaciones y obras 13

B. Estudios realizados 15

C. Inspección de lesiones 17

C.1 Exterior del edificio 17

C.2 Interior del edificio 22

D. Toma de datos mediante instrumentación 23

E. Estudio de caracterización de sales 29

F. Estudio e hipótesis sobre el origen de las sales 37

G. Monitorización higrotérmica 43

H. Ensayo de seguimiento de secado de las losas 59

I. Ensayo de higroscopicidad de las losas 63

J. Conclusiones finales del estudio 69

K. Glosario de términos 75

Este documento explica la investigación realizada sobre las lesiones que afectan al pavimento de la Capilla del Cristo del Monasterio de Santa María de Conxo.

El Consorcio de Santiago promueve los estudios de intervención en este edificio. Se deseaba conocer las causas de las lesiones que aparecen en el enlosado, que consisten en un oscurecimiento húmedo casi constante desde el otoño. Se encarga esta investigación a la arquitecta Doña Soledad García Morales, perteneciente al Grupo de Intervención en el Patrimonio Arquitectónico (AIPA) de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (ETSAM-UPM). El equipo de arquitectos formado por Soledad García, Raquel Otero Ortiz de Cosca y Hugo Allegue Castelos, trabaja durante un año haciendo un seguimiento del comportamiento del edificio mediante técnicas de monitorización higrotérmica, inspecciones periódicas, ensayos "in-situ" y en laboratorio.

Este Cuaderno Técnico pretende dar a conocer estos trabajos para que puedan servir como referente a otros casos de estudio similares de la ciudad, dado que la patología de humedad es habitual en edificaciones históricas con esta tipología constructiva y en esta localización geográfica.

BREVE RESEÑA HISTÓRICA DE LA CAPILLA DEL CRISTO

A partir del estudio de Dña. Belén María Castro Fernández

Los orígenes de Santa María de Conxo se remontan al siglo XII, cuando el arzobispo Diego Gelmírez (1070?-1140) derriba la primera iglesia, pequeña y prácticamente arruinada, para construir una nueva y un convento en el que se instalan monjas. De esta edificación se conservan dos arcos románicos del claustro, en los que se puede leer la inscripción fundacional de 1129.

A partir del siglo XVI, el monasterio de Conxo estuvo habitado por la Orden de la Merced, que derribó en el siglo XVII la iglesia románica para construir una más amplia, que sirviese a las necesidades de la comunidad y a sus funciones de parroquia. Al parecer, el autor de la iglesia fue Fray Gabriel de las Casas, aunque no todos los autores están de acuerdo en ello

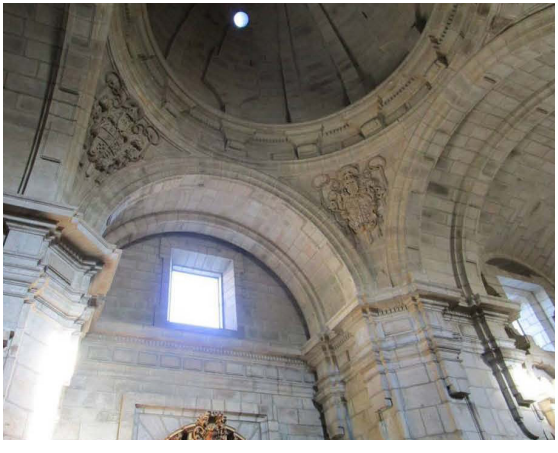
La construcción de la Capilla del Cristo se remonta a los orígenes de la primitiva iglesia; es muy probable que fuera pequeña. Posee una imagen del Crucificado tallada por Gregorio Fernández y por el auge del culto que recibía dicha talla posiblemente se impulsó la construcción de una nueva capilla hacia el año 1729. Su principal impulsor fue el padre Alberto Gómez, con el respaldo económico del también mercedario Fr. García de Pardiñas y Villar deFrancos, obispo de Tarazona. El maestro a quien se le encarga su ejecución es Simón Rodríguez. Las construcción duró unos 7 años y fue inaugurada en 1743.

La Capilla tiene planta de cruz latina, con una sola nave muy corta, un tramo de crucero y capilla mayor rectangular. Ésta, siguiendo el eje longitudinal del conjunto, tiene adosado un camarín, dando como resultado una planta de cruz latina invertida, efecto que desde el interior de la Capilla no se percibe, al quedar la visión interceptada por el Retablo Mayor.

El alzado se organiza mediante un sistema de pilastras de orden toscano arquitrabado. Las pilastras que flanquean los machones del crucero parten de un alto pedestal moldurado y tiene su fuste rehundido, tan característico del lenguaje artístico desplegado por el maestro Simón Rodríguez en sus obras. El fuste se remata con una placa de cortes rectangulares que, por su grosor, permiten resaltar el capitel y la cornisa de gran vuelo.

Las pilastras de los brazos del crucero y de la nave longitudinal quedan interrumpidas por la placa citada para rematar con otra placa semicircular y continuar hacia el suelo con un simple rebaje en el muro, como si se tratase de pilastras en negativo.

La cubierta de la nave de la Capilla se resuelve mediante bóveda de cañón reforzada por arcos fajones, mientras que el crucero se cubre con una media naranja levantada sobre pechinas. La cúpula se levanta sobre un anillo de cuerpo tripartito, el primero formado por escocia entre filetes y toros, el central con almohadillado y el tercero a manera de cornisa con dentículos interrumpidos por ménsulas que se apean en las volutas del segundo cuerpo.



En el primer tramo del brazo longitudinal se dispone un coro alto montado sobre bóveda rebajada de cantería, al cual se accede mediante una escalera embutida en el grosor del muro que separa la Capilla de la sacristía de la iglesia conventual.

En los brazos del crucero se abren arcos de medio punto, albergados en un marco adintelado, con cajeado en su parte interna y acodos en

el tercio inferior funcionando como pedestales, para alojar los retablos menores. La riqueza decorativa de la Capilla se completa con dos nichos destinados a sepulcros presididos por el escudo de armas del obispo de Tarazona. Simón Rodríguez se aparta de los modelos tradicionales que cuentan con figuración para proponer unos esquemas geométricos basados en el juego de placas y volutas.

El camarín situado detrás del Retablo Mayor, presenta planta cuadrangular. La parte central está cubierta con bóveda de arista, mientras que en los laterales se opta por bóveda de cañón reforzada por arcos fajones igual que en la cabecera. Consta de dos cuerpos comunicados por escaleras, de caja rectangular, situadas en el ángulo del muro oriental. Su función cultual se perdió tras la Desamortización convirtiéndose en la sacristía de la Capilla, pues ésta se servía hasta ese momento de la conventual.

La portada de la Capilla registra la sintaxis propia del estilo barroco. Su esquema es similar a la puerta del otro lado del crucero, que comunicaba con el antiguo convento. Alberga una puerta adintelada con marco moldurado, flanqueada por pilastras de orden toscano que soportan un frontón curvo interrumpido en su parte media para dejar espacio para el escudo del Obispo de Tarazona.

6

A.1 Entorno del edificio.

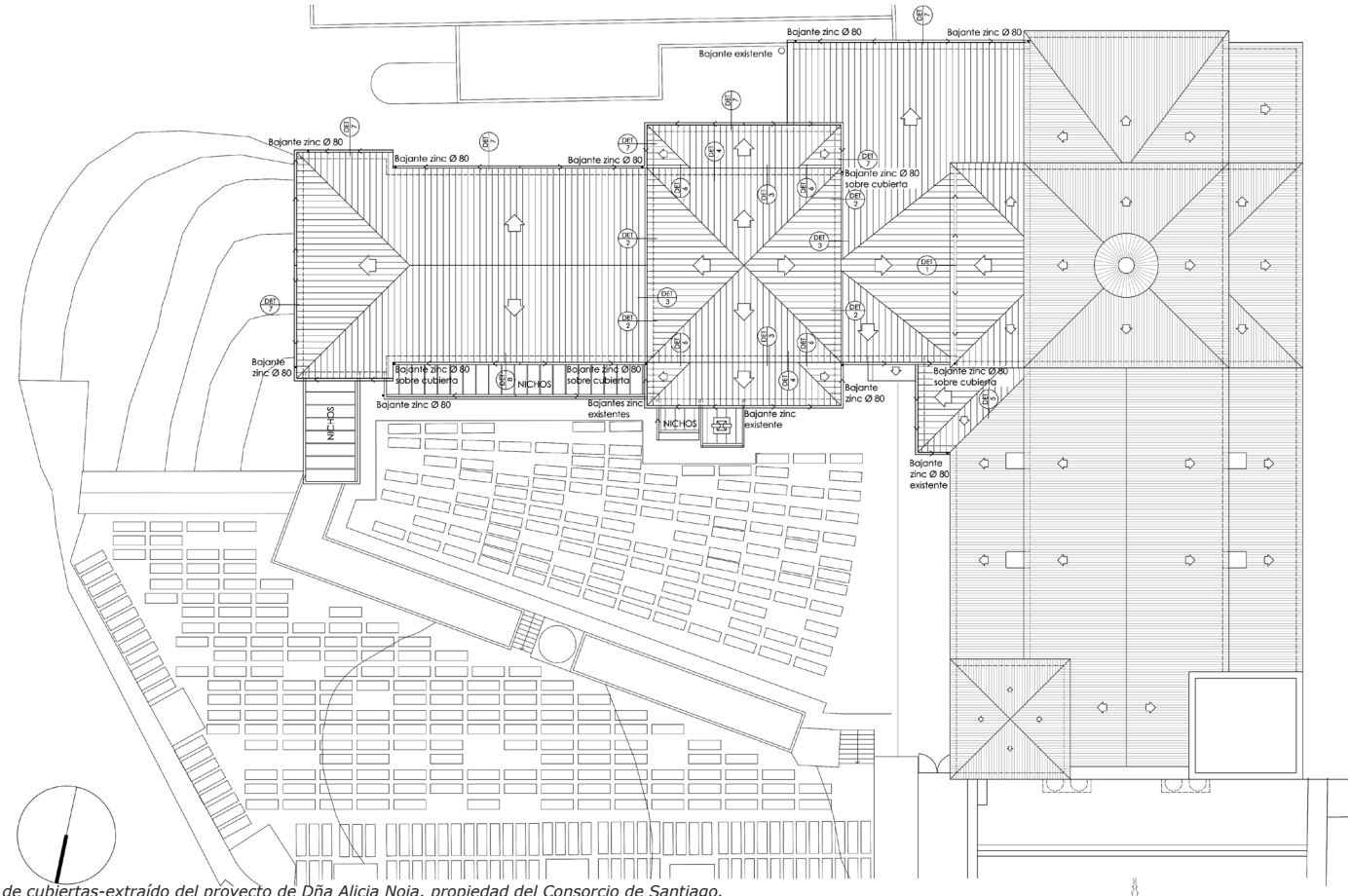
El conjunto que forman la Iglesia, el cementerio y la Capilla del Cristo se encuentra en una superficie elevada respecto a las edificaciones, calles y jardines colindantes. El terreno presenta primero suave pendiente en dirección Este-Oeste, junto a la fachada del Monasterio, y el punto más elevado lo ocupa el cementerio. Se accede actualmente a este cementerio por una puerta junto a la portada de la Iglesia. En la foto desde la calle se puede ver cómo la plaza y la calle de Ramón Baltar han debido ser explanadas un poco, pues el cementerio queda más alto que el pavimento de estos espacios. Por esta razón, el recinto del cementerio forma hoy en día como una meseta algo sobreelevada y cercada por un muro de piedra.

El muro Norte de la capilla está enterrado 75 cm. Hay además un muro de nichos adosado a él. Este cuerpo de nichos está rematado por una cubierta plana.

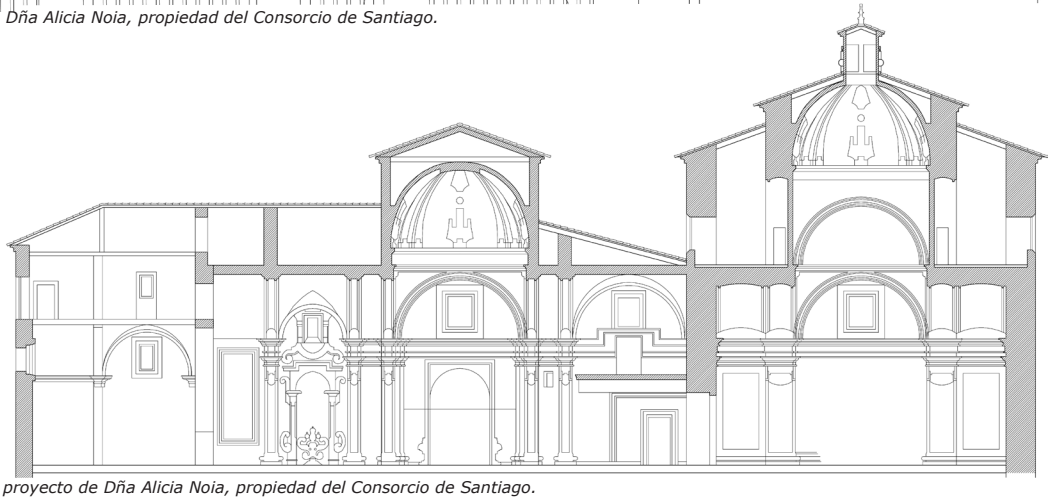
Si se sigue rodeando el edificio, el terreno desciende bastante en dirección Noreste-Suroeste, en dirección al río Sar. El terreno junto al muro Sur está 75 cm por debajo del pavimento de la Capilla como se aprecia en la sección transveral. Como ésta no tiene cripta conocida, es de suponer que el terraplén esté relleno con la tierra que aloja las sepulturas.

Vista de los nichos en el muro Norte

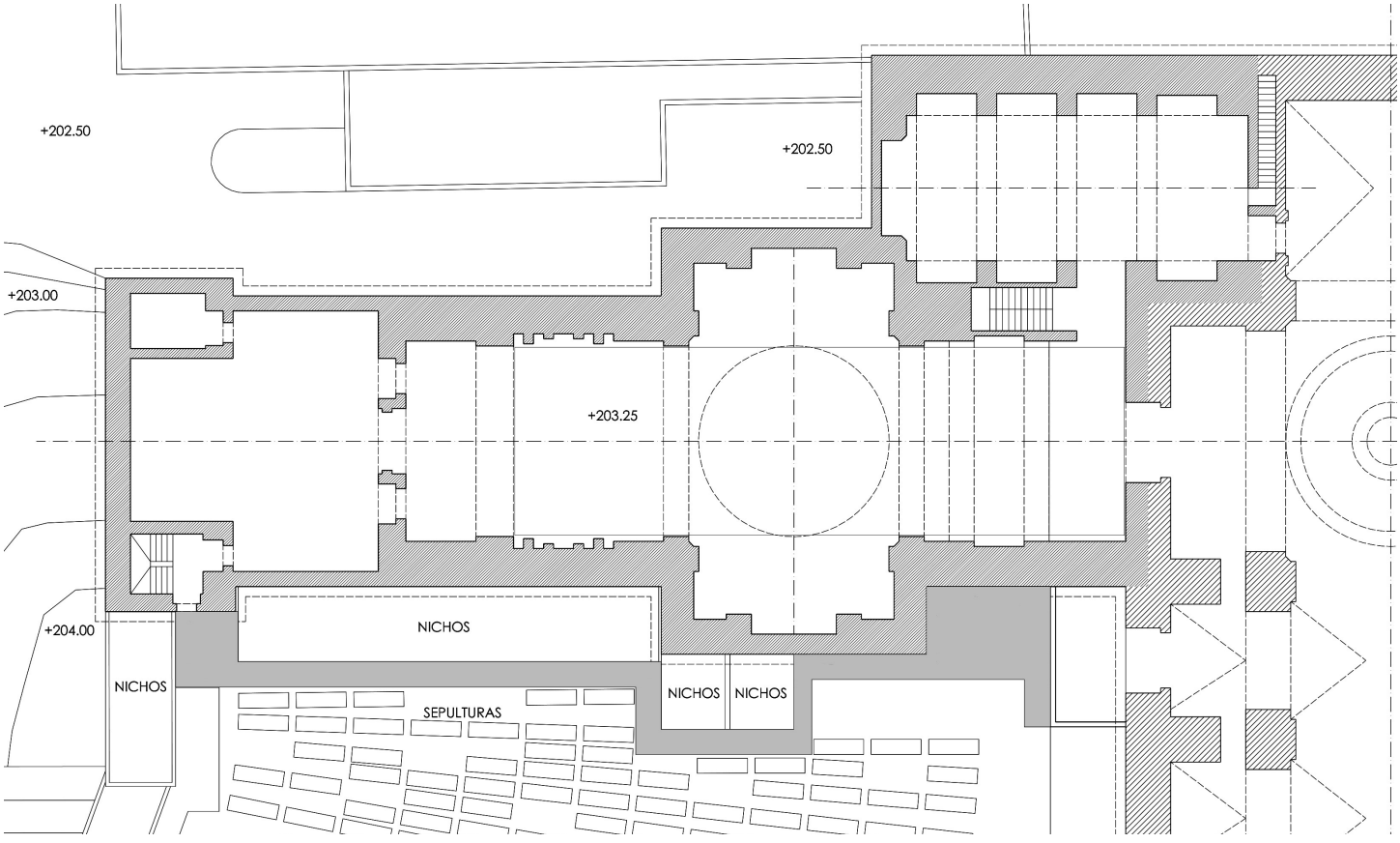
Vista de la cubierta de los nichos



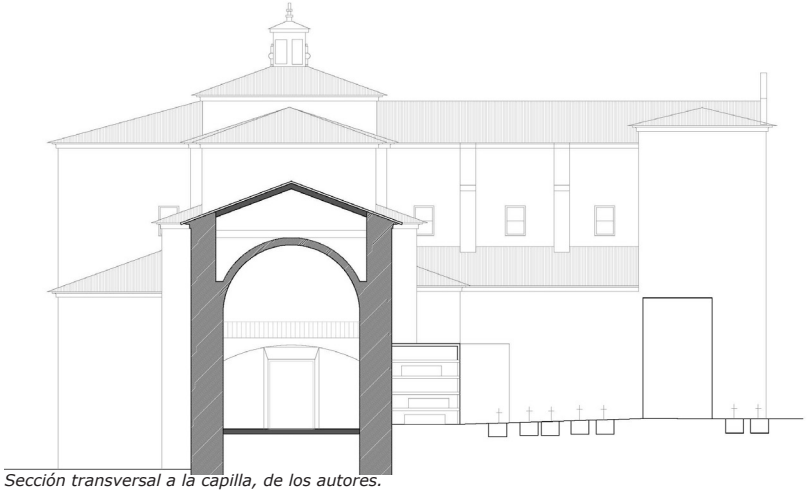
Planta de cubiertas-extraído del proyecto de Dña Alicia Noia, propiedad del Consorcio de Santiago.



Sección longitudinal a la capilla-extraído del proyecto de Dña Alicia Noia, propiedad del Consorcio de Santiago.



Planta de la capilla-extraído del proyecto de Dña Alicia Noia, propiedad del Consorcio de Santiago.



Sección transversal a la capilla, de los autores.

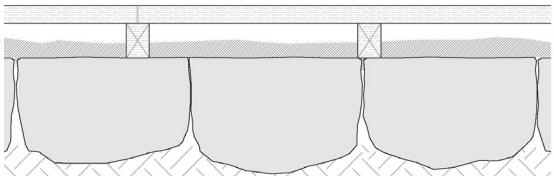
A.2 Sistemas constructivos

Los muros de carga de la Capilla son de sillería de granito bien trabajada en la hoja interior y careada, con hiladas horizontales bastante marcadas por juntas de mortero, en el exterior, desconociéndose el tipo de relleno o traba que pueda haber entre ellas. Los arcos que trasladan el empuje de las bóvedas y la cúpula a los muros no se manifiestan en el exterior y los contrafuertes quedan absorbidos en el espesor de los muros. En los muros, desde el exterior, se aprecia una zarpa formando moldura y dos hiladas de sillería, que indica (en el muro Sur) el arranque del muro sobre la cimentación.

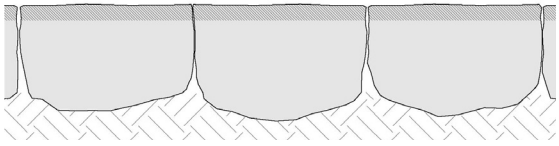
El camarín tiene muros más delgados que el resto del edificio, Los empujes de las bóvedas cargan sobre arcos que a su vez derivan las cargas hacia los dos cuerpos que flanquean el muro Este (escalera y aseo actual), que contrarrestan los empujes. Hay varias ventanas que se abren en los muros Norte y Sur, y también en el muro Este del camarín. La cúpula sobre el crucero tiene cuatro pequeños huecos circulares, que posiblemente jugaron el papel de permitir la ventilación y que a día de hoy se encuentran cerrados por vidrio.

El pavimento, objeto de estudio, es un enlosado de granito, formando calles de sepulturas separadas por entrecalles también de granito. Las sepulturas más regulares se encuentran bajo el crucero. Hay tres losas por sepultura y al menos una de ellas tiene orificio para facilitar su levantamiento.

El tejado tiene dos, tres o cuatro aguas dependiendo del cuerpo de la capilla que cubra. Originalmente se debía evacuar el agua mediante gárgolas, todavía visibles en algún punto. El sistema actual es a base de canalones y bajantes, recientemente reformados en la intervención promovida por el Consorcio de Santiago bajo la dirección de Dña. Alicia Noia. Las bajantes conducen el agua a un sistema de tuberías enterradas, sujetas a la pared lateral de la atarjea, construidas en la misma intervención.



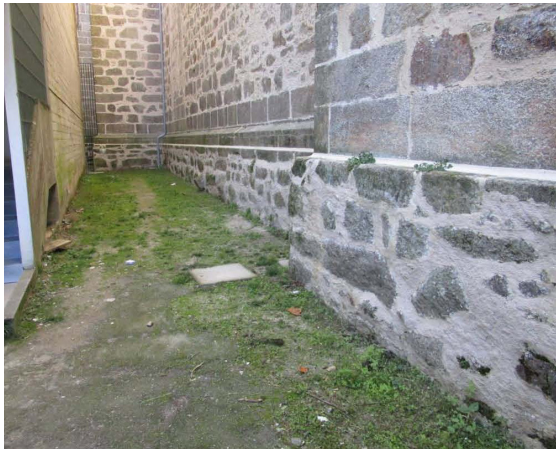
pavimento antiguo, con el recubrimiento de cenizas y acabado de tarima de pino tea sobre el enlosado de granito.



pavimento actual, tras retirar el acabado de tarima y las cenizas. Se marca sombreado la capa superficial del enlosado, más contaminada.

Pavimento actual en la zona central de sepulturas, donde el pavimento no está en contacto con el terreno. A pesar de esto, se encuentra igualmente contaminado que el resto del enlosado.

Muro Sur en diciembre de 2014



A.3 Datos históricos sobre reparaciones y obras.

El edificio ha pasado por tres obras documentadas. Las dos primeras (proyectos de 1964), fueron dirigidas por Francisco Pons Sorolla y José L. García Fernández. Las intervenciones tuvieron por objeto la "reparación general del monumento y la ordenación de sus accesos y embellecimiento del entorno".

Obras de 1965-66

La principal reparación que se hizo en esos años fue la de las cubiertas de la Iglesia de Santa María, y la consolidación de algunas grietas de la capilla del Cristo.

"Los técnicos proyectaron la limpieza general del trasdós de las bóvedas de la iglesia, al tiempo que la renovación total del material sustituyendo la estructura de madera por otra metálica, en la nave principal y Capilla del Cristo, como elementos sustentantes de un tablero doble de rasilla, impermeabilizado, que recibiría la renovada teja curva".

No está del todo claro que se llegaran a realizar la obra en la propia Capilla del Cristo, pero sí en la iglesia.

Obras de 2012

Intervención promovida por el Consorcio de Santiago bajo la dirección de Dña. Alicia Noia, sobre reparación de cubiertas, canalones, bajantes, y sistema de atarjeas para recogida de pluviales. La reparación de tejados consistió en el levantamiento y recolocación de las tejas, y construcción de nuevos canalones, bajantes y baberos. En los muros, se rejuntó la fábrica por el exterior y se repararon los baberos y guardapolvos de las ventanas.

Pavimento

Según se ha informado, antiguamente, sobre el enlosado de la capilla, se disponía una capa de cenizas vegetales y una tarima de pino tea como acabado. En una de las intervenciones realizadas se retiraron ambas.

1. Inspección visual de lesiones.

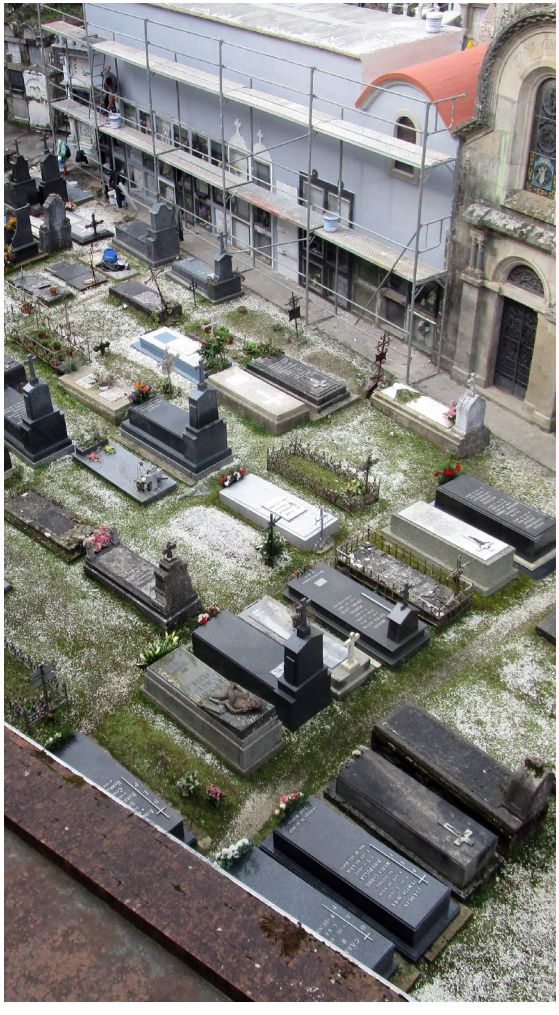
2. Detección de focos de humedad en el interior mediante inspección higrotérmica con termohigrómetro de lectura instantánea. Entre los meses de diciembre de 2014 a junio de 2015 se llevaron a cabo varias tandas de Inspección higrotérmica mediante auscultación con termohigrómetro portátil. Con ellas se pudieron localizar y representar los focos de humedad más importantes que aparecen en la Capilla. Los resultados se cartografiaron sobre planos de planta y sobre fotografías.

3. En estos meses se llevó a cabo un estudio de detección de sales en los enlosados y muros. La técnica empleada ha sido no destructiva y ha consistido en el uso de papetas húmedas de celulosa sobre los paramentos, sobre las que se hacen ensayos químicos mediante tiras de reactivos de cloruros y nitratos.

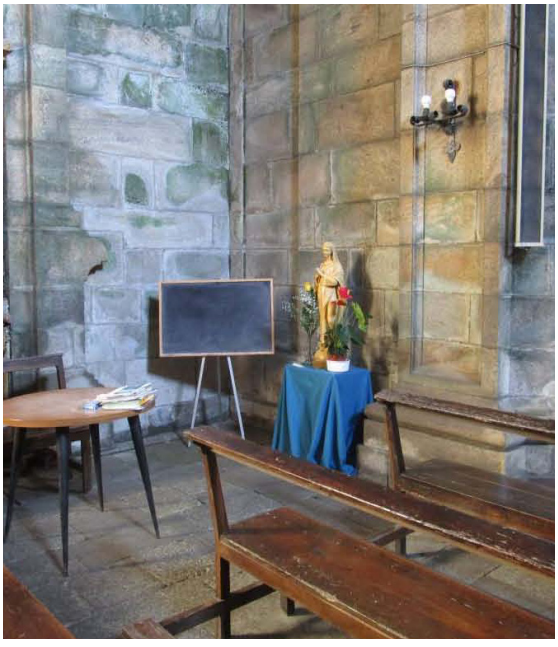
4. Se ha hecho también un pequeña investigación biológica de las posibles causas de la contaminación de nitratos del enlosado.

5. Monitorización higrotérmica del edificio, desde diciembre de 2014 hasta noviembre de 2015. Se han instalado cuatro termohigrómetros de tipo data-logger, de registro continuo, propiedad del Consorcio de Santiago, en puntos que se han seleccionado para poder evaluar la evaporación de uno de los puntos del muro en los que se ha detectado un foco de humedad. Con esos datos se hace el siguiente trabajo:

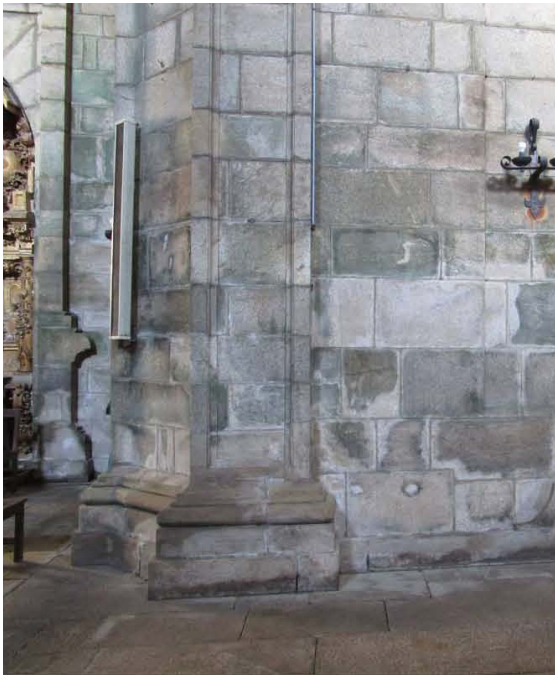
Vista superior del cementerio en el muro Norte



Vista interior del muro Norte



Vista interior del muro Sur



a. Se convierten los datos a Excel.

b. Se calcula el grado de humedad.

c. Se elaboran gráficas de seguimiento y se analizan estadísticamente los resultados obtenidos.

d. Con datos de al menos una semana de cada mes, se elaboran ábacos psicrométricos que permiten el análisis y seguimiento del edificio

6. Se ha hecho un experimento "in situ" para el seguimiento del secado de las losas a lo largo de varios meses. El ensayo ha consistido en el levantado de dos losas, y su recolocación en su mismo sitio, pero aisladas del terreno:

a. Una de ellas, mediante un plástico por debajo, colocada de nuevo en su hueco.

b. Otra, sin plástico, pero ligeramente levantada de su posición, para que no tenga contacto con el terreno y esté ventilada por debajo.

Las losas se han ido siguiendo a lo largo de estos meses, mediante inspección visual, para evaluar si secan de forma diferente al resto del pavimento, entre el 17 de marzo y el 5 de abril de 2015.

7. Estudio de la higroscopicidad de las losas: para hacer este ensayo se aprovecharon dos pequeños trozos de piedra que se desprendieron al levantar las losas, en el ensayo anterior. Sobre estas dos muestras se han hecho los siguientes ensayos:

a. Determinación del contenido en humedad (Ho), por método gravimétrico (pesadas antes y después de secar las muestras).

b. Curva de comportamiento higroscópico en cámara húmeda, al 75% y al 98% de humedad relativa ambiente. Se van pesando las muestras semanalmente, calculando el porcentaje de peso de agua que capturan "del ambiente", hasta que el peso se estabiliza.

c. Coeficiente de absorción de las losas (Ca), mediante inmersión a saturación.

C.1 Exterior del edificio

En general los muros se encuentran en buen estado, y los morteros del rejuntado reciente también.

Muro Norte

En las fotografías se pueden ver las pátinas biológicas producidas por los escurridos del agua de cubiertas, más intensos en la unión entre Capilla e Iglesia. En esta zona se producía desde antiguo el vertido mediante gárgolas, y por la configuración del terreno, el agua tendría poca posibilidad de evacuación, al generarse un rincón más bajo que el resto del cementerio. El agua tendría tendencia a embolsarse en el terreno y a filtrarse en él discurriendo en la dirección de las pendientes naturales.

En la intervención de 2012 se ha planteado precisamente la solución a este problema, con la creación de redes de drenaje del agua del terreno de estas zonas conflictivas.

Los nichos adosados al muro Norte podrían haber estado haciendo un doble efecto sobre el terreno junto al muro Norte:

a. Por una parte, el agua de lluvia caída directamente al terreno, delante de los nichos, se embebería en el terreno (se trata

Vista del muro Norte

Muro Norte. Se observa las manchas por escurrimiento del agua de lluvia en los muros donde se pegan los nichos en la parte Norte.

Muro Sur en Mayo de 2016

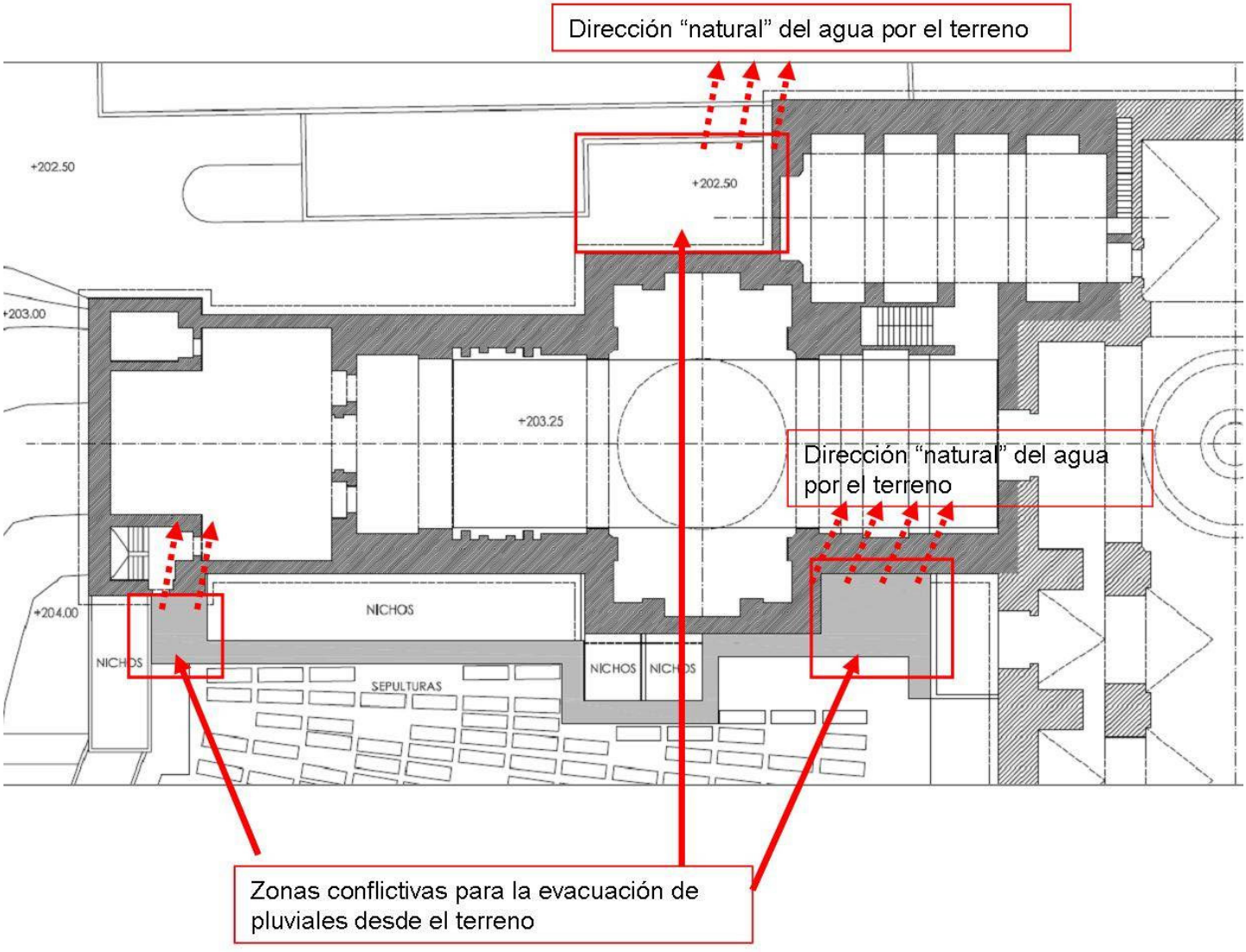
también de una zona conflictiva de drenaje), pero al separar este agua del muro de la Capilla, harían un cierto efecto protector.

b. Pero por otra parte, si los nichos carecen de cimentación, el agua retenida en el terreno quedaría bajo ellos, dificultándose la evaporación y afectarían a la cimentación durante más tiempo.

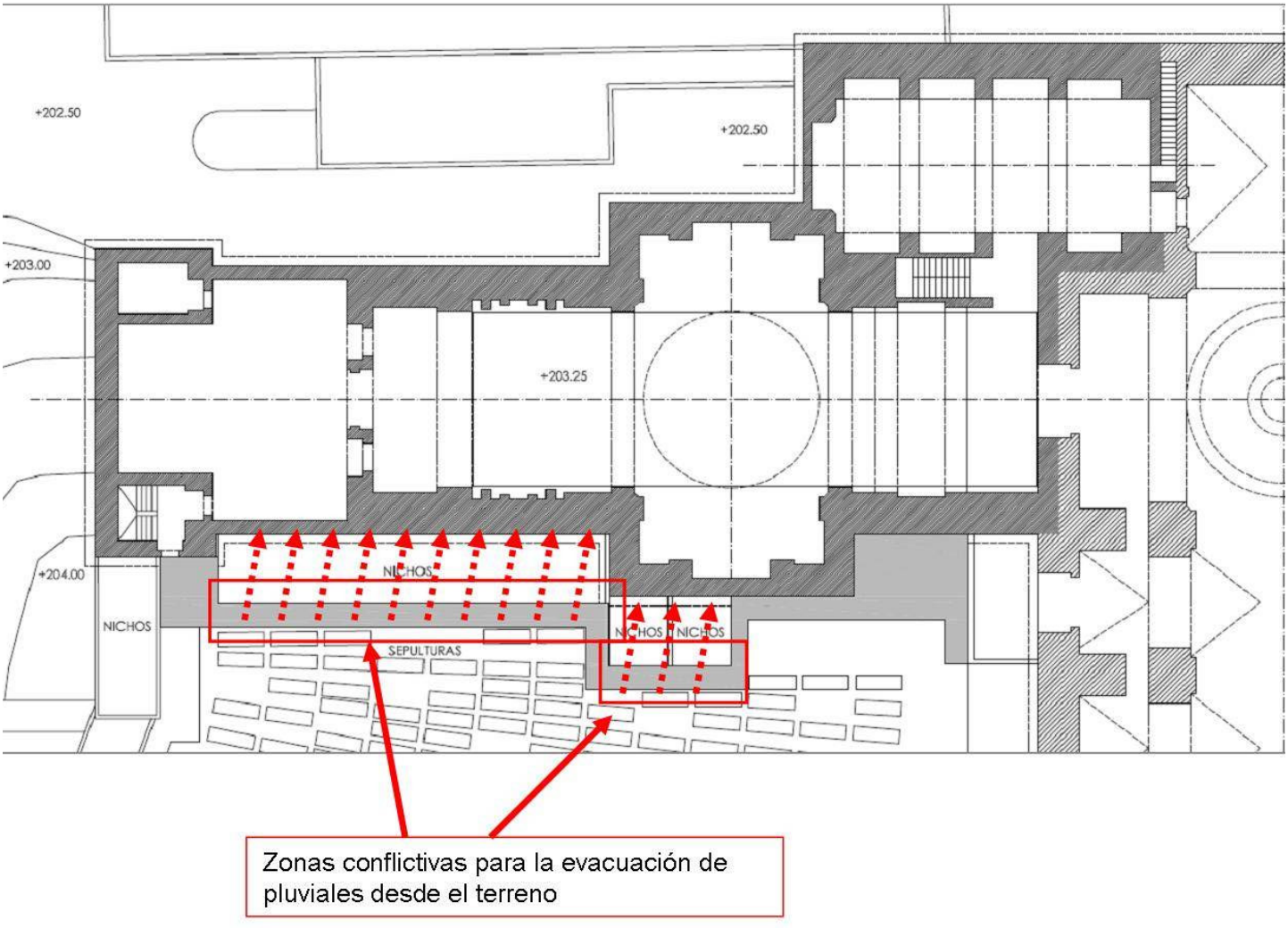
En las fotos puede verse que no sólo hay sepulturas junto al muro Norte en el cuerpo de nichos, sino también en el terreno. Teniendo en cuenta que el pavimento de la Capilla está por debajo de la cota del cementerio, el agua probablemente hacía bastante daño al muro Norte y debía haber bastantes humedades en su primer metro.

Muro Sur

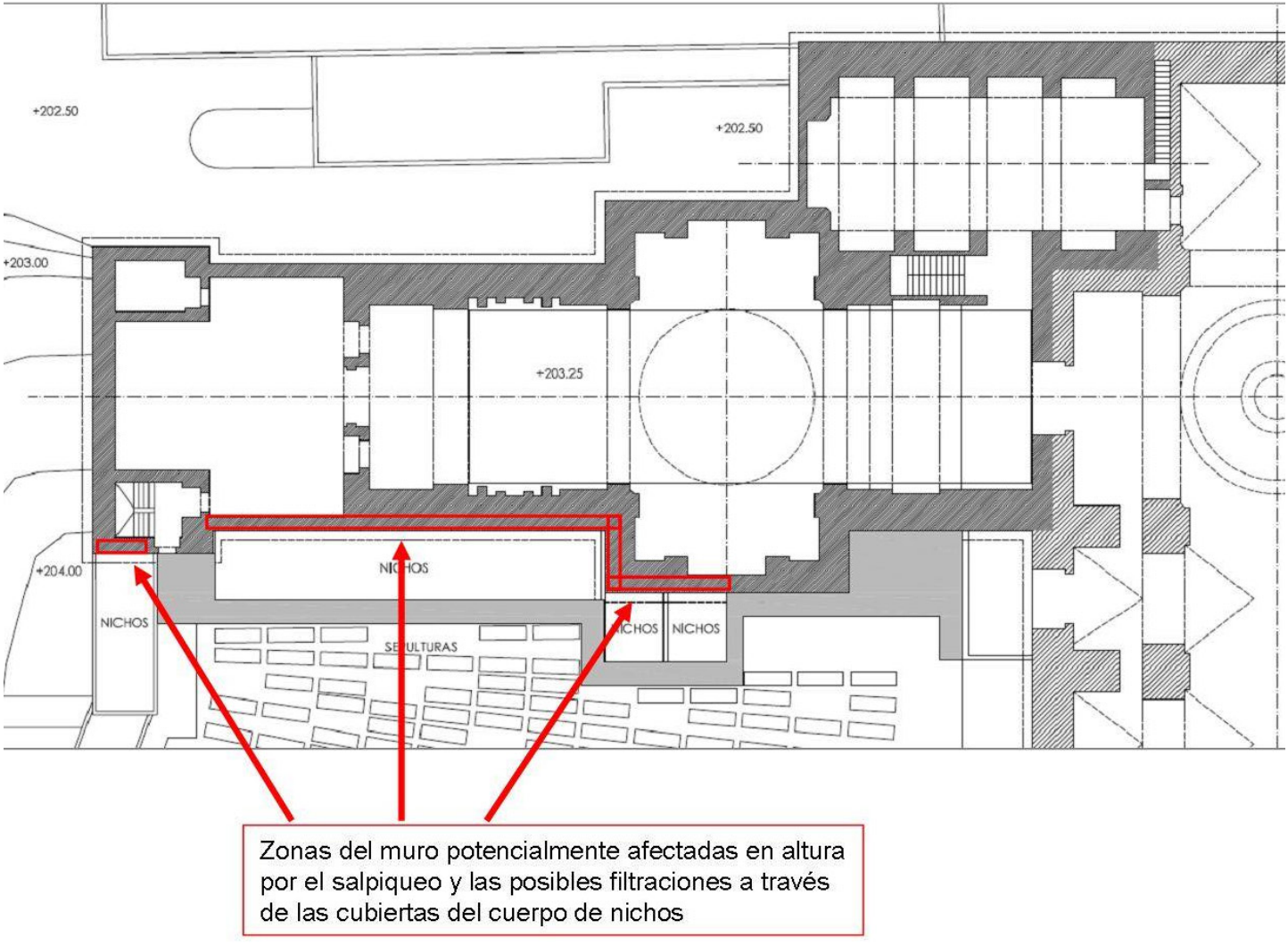
El muro Sur mostraba (antes de la intervención de 2012) signos de filtración de humedad entre las juntas de los sillares del zócalo. Esta hilada marca posiblemente la cota del pavimento interior, y el resalto de la zarpa estaba cubierto de musgo y plantas. La lesión podía deberse tanto al salpiqueo directo sobre la zarpa del agua de lluvia desde los faldones, como a alguna filtración que proviniera "desde dentro" de la capilla (desde el terreno), y rezumara entre las juntas. Si se compara con el estado actual en general han desaparecido las lesiones en el zócalo, por lo que cabría suponer que la causa era el salpiqueo directo, ahora evitado por la existencia de canalones.



Plano que ilustra las zonas de terreno más conflictivas en origen, respecto a la evacuación de pluviales vertidos desde el tejado.

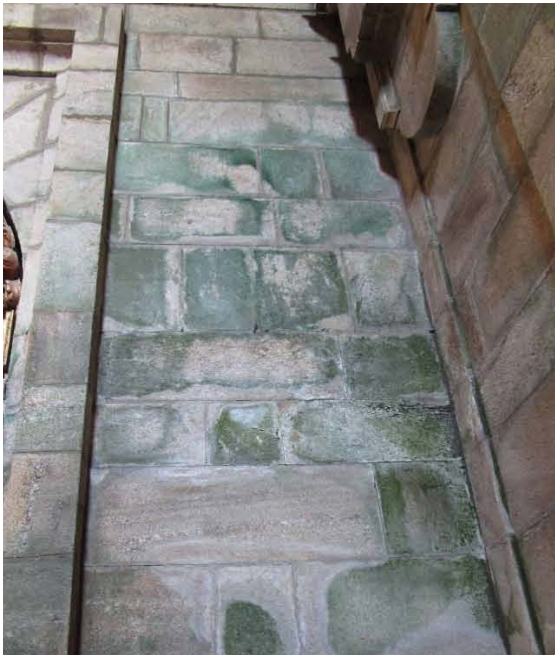


Plano que ilustra el efecto de posible acumulación de agua bajo los nichos, antes de la intervención de 2012.



Plano que ilustra la afección potencial a los muros, en altura, por el agua salpicada o filtrada a través de las cubiertas del cuerpo de nichos.

Crecimiento de algas en muro norte en altura.



Crecimiento de algas en pilastra en muro norte

C.2 Interior el edificio

La lesión más relevante aparece en el muro Norte, en altura. Se aprecia el color verdoso del crecimiento de algas. La posición y la altura parecen corresponder con el tejadillo del cuerpo de nichos adosado a este muro del crucero.

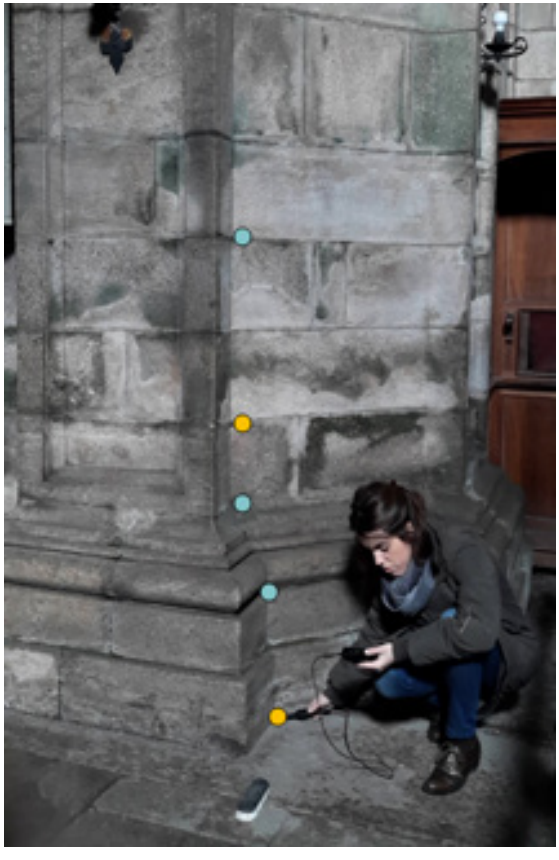
Al nivel de los zócalos, se aprecian zonas de oscurecimiento irregulares, más visibles en el muro Norte que en el Sur. Es difícil apreciar el grado de intensidad de las lesiones sólo visualmente. La única pilastra que aparece en buen estado es la SO, que es el único elemento de la capilla que no forma parte de la envolvente.

También se observan oscurecimientos difusos en los muros Oeste y Norte del sotocoro, sin que se pueda precisar más. No hay lesiones en las bóvedas ni al nivel de las impostas.

El pavimento enlosado muestra oscurecimientos húmedos bastante extensos, que en principio no tienen correlación con ningún factor constructivo del edificio. Según se ha informado, las manchas son persistentes y se van oscureciendo a medida que avanzan el frío y la humedad del invierno.

En el camarín, que tiene muros de menor espesor, sin la sillería decorativa, se pueden apreciar signos de que las fábricas tienen cierta permeabilidad al agua de lluvia, pues aparecen manchas de humedad marcando las juntas en algunas zonas, sobre todo en el muro Sur, contorneando el arco formero. Esta humedad puede tener algo que ver con la que aparece en la bóveda sobre el aseo. Se pueden ver lesiones similares en algunos otros muros. Se trata de lesiones en altura, que no hablan de humedad del terreno, sino de algún tipo de filtración de agua de lluvia, o incluso de alguna posible avería en el aseo.

Imagen de medición manual con termohigrómetro en el muro norte



La toma de datos mediante instrumentación es lo que denominamos como "*Inspección higrotérmica*". Se trata de una técnica que permite detectar los verdaderos "focos" de evaporación del edificio, que pueden no corresponder con las lesiones aparentes, en este caso, las manchas oscuras en el enlosado. Para ello se ha llevado a cabo una campaña de auscultación de datos higrotérmicos mediante termohigrómetro de lectura instantánea.

El fundamento de la inspección consiste en que cuando un material está evaporando la humedad pasa al aire que rodea su superficie y es posible medir entonces la diferencia de humedad entre el aire junto a los paramentos y el de la sala, e incluso comparar ambos con el exterior, que es el ambiente seco y de referencia. Los resultados se analizan estadísticamente y para su interpretación se cartografían sobre planos.

Se cartografían los datos higrotérmicos de inspección obtenidos sobre un plano de situación de la capilla. (Fig.01 y 02) A cada una de las zonas del edificio se le asigna un código numérico, como se ve en la imagen.

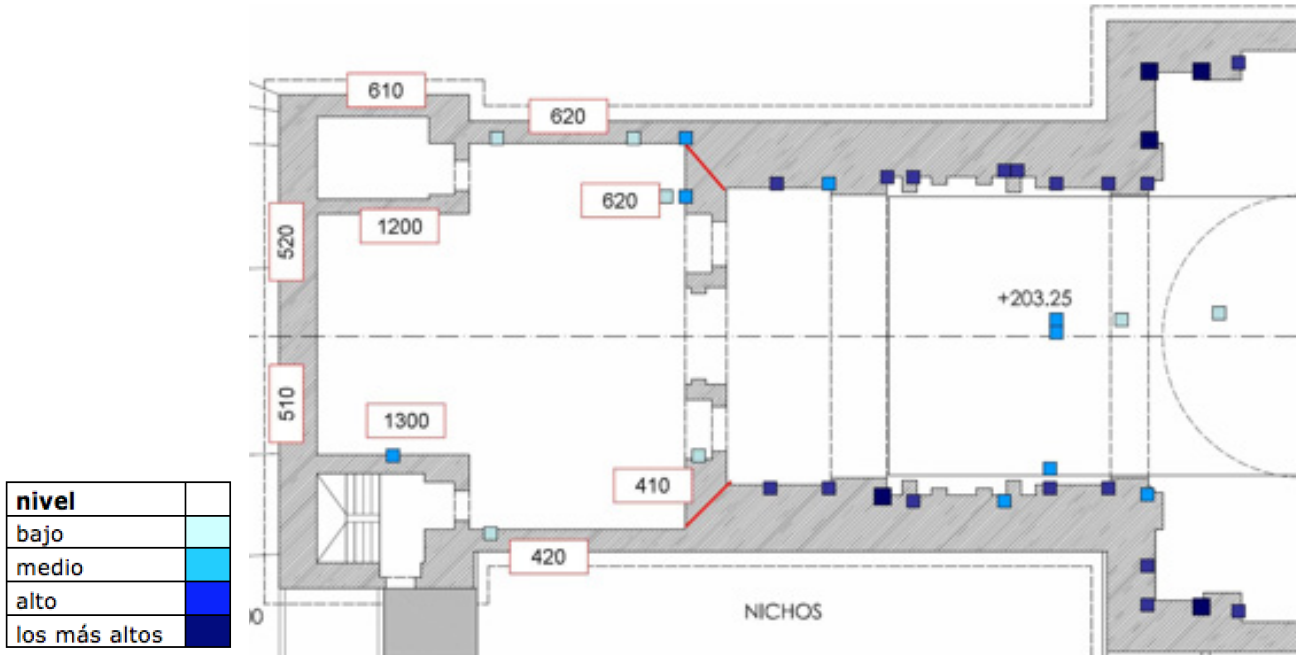
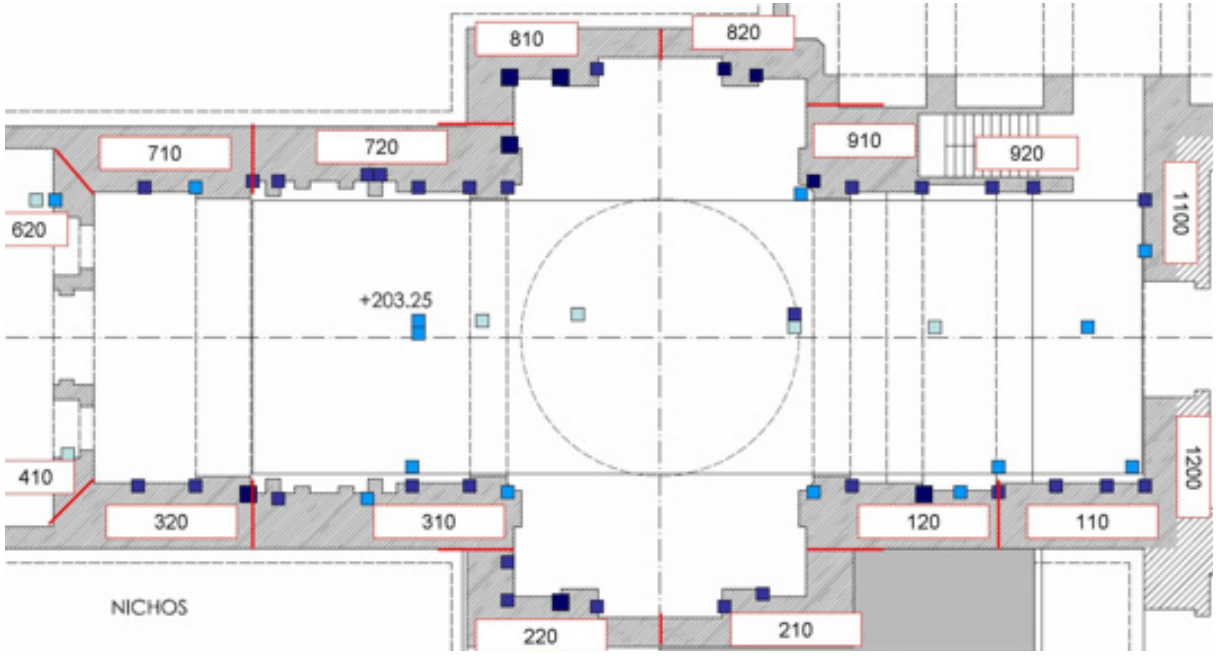


Figura 1.(Superior)Cartografía de la inspección del 5 de diciembre de 2014, en el camarín.

Figura 2.(Inferior) Cartografía de la inspección del 5 de diciembre de 2014, en la Capilla.



Esto facilita la clasificación de los datos. Los focos de humedad siguen un código de colores establecido con el total de los valores. Se representan también los valores de humedad en imágenes sobre pared.

Los focos detectados en pared, en la primera inspección, el día 5 de diciembre de 2014, en el muro Norte y Sur del sotocoro eran bajos, según la escala general. En el muro Norte los focos suben más que en el Sur (Fig.03). En la inspección higrotérmica de marzo de 2015, se han vuelto a estudiar los focos de humedad, por niveles de intensidad, sobre las fotos del interior (Fig.04). La toma de datos en los mismos focos detectados a lo largo de diferentes meses del año permite evaluar la capacidad de evaporación del edificio.
Los focos de mayor evaporación se detectaron en el muro Sur, en la zona de muro denominado como 810 (Fig.06-08).

En el caso de los puntos tomados sobre el enlosado, los valores no son muy elevados, a pesar de que en el levantado de dos de las losas que se hizo en primavera se observó la humedad de la tierra, y se pudo medir el contenido en humedad de la misma, en la zona de las tumbas, que era de 17,78 % de porcentaje de humedad en peso. La tierra estaba entonces, por lo tanto, húmeda (o más bien "mojada"), y aunque no se puede generalizar, pues sólo se ha podido tomar una muestra, este valor ya es significativo, pues justamente la zona de tumbas no es donde se miden mayores evaporaciones. (Fig. 02)

Las áreas donde se ha podido medir mayor evaporación en el pavimento parecen corresponder a dos zonas:
−Una de ellas corresponde al rincón en la zona 810 (Fig.01), que es la que detectamos como la más húmeda, curiosamente en el muro Sur.

nivel	
normal	
bajo	
medio	
alto	
los más altos	

Figura 03.Cartografía de focos. Día 5/Diciembre/2014

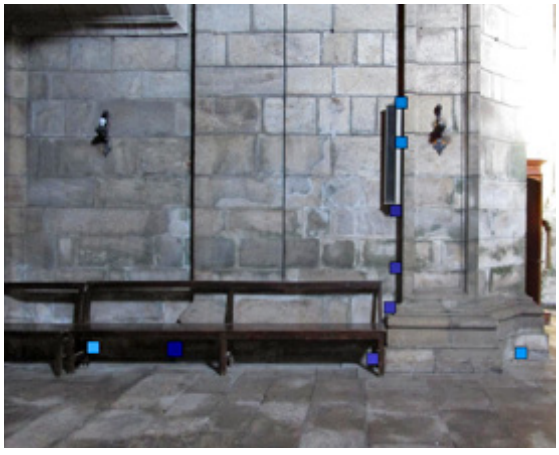


Figura 04.Cartografía de focos. Día 14/Marzo/2015

Figura 05.Cartografía de focos. Día 31/Marzo/2015

Figura 06.Focos en zona 810. Día 17/Marzo/2015

Figura 07.Focos en zona 810. Día 31/Marzo/2015

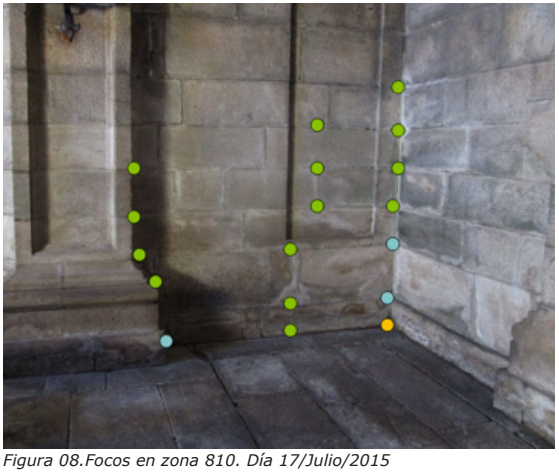
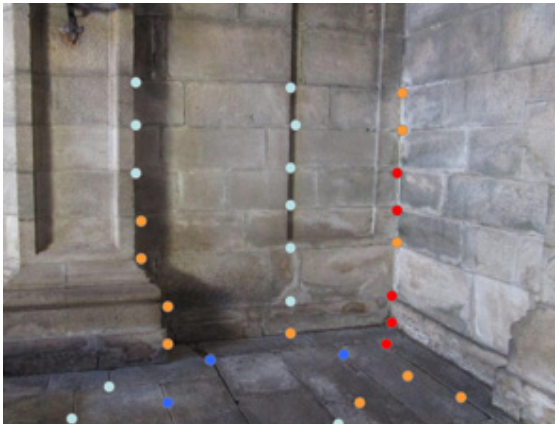


Figura 08.Focos en zona 810. Día 17/Julio/2015



−La otra tiene forma como de una franja que recorre el crucero y el sotocoro, en diagonal (Fig.09). No muestra una humedad uniforme, pero los puntos más intensos se localizan en esta franja. La forma parece sugerir como si hubiera un línea preferente de recorrido de la humedad, lo cual sería coherente con la hipótesis de que el terreno del cementerio drena siguiendo esta línea bajo el pavimento de la capilla.

De todas formas, los valores de evaporación que se obtienen no son demasiado altos, pues hay poca diferencia entre los valores de grado de humedad que se obtienen en los focos más intensos, y los de la media. Sobre el pavimento se mide una capa de aire húmedo más o menos uniforme, que produce una humedad relativa alrededor del 85%, y que parece estar "estabilizada", pues unos centímetros más arriba ya no se aprecia tanto. Este dato, unido a los resultados sobre higroscopicidad de la superficie de las losas, que se hicieron para entregas anteriores, nos sugiere que tal vez la superficie de las losas crea una humedad de equilibrio en torno a esos valores y que por eso la humedad persiste en el enlosado, en vez de evaporar con eficacia. Como además la tierra analizada es también higroscópica, igual que los restos de cenizas que quedan en algunos lugares, parece que al pavimento le cuesta especialmente evaporar.

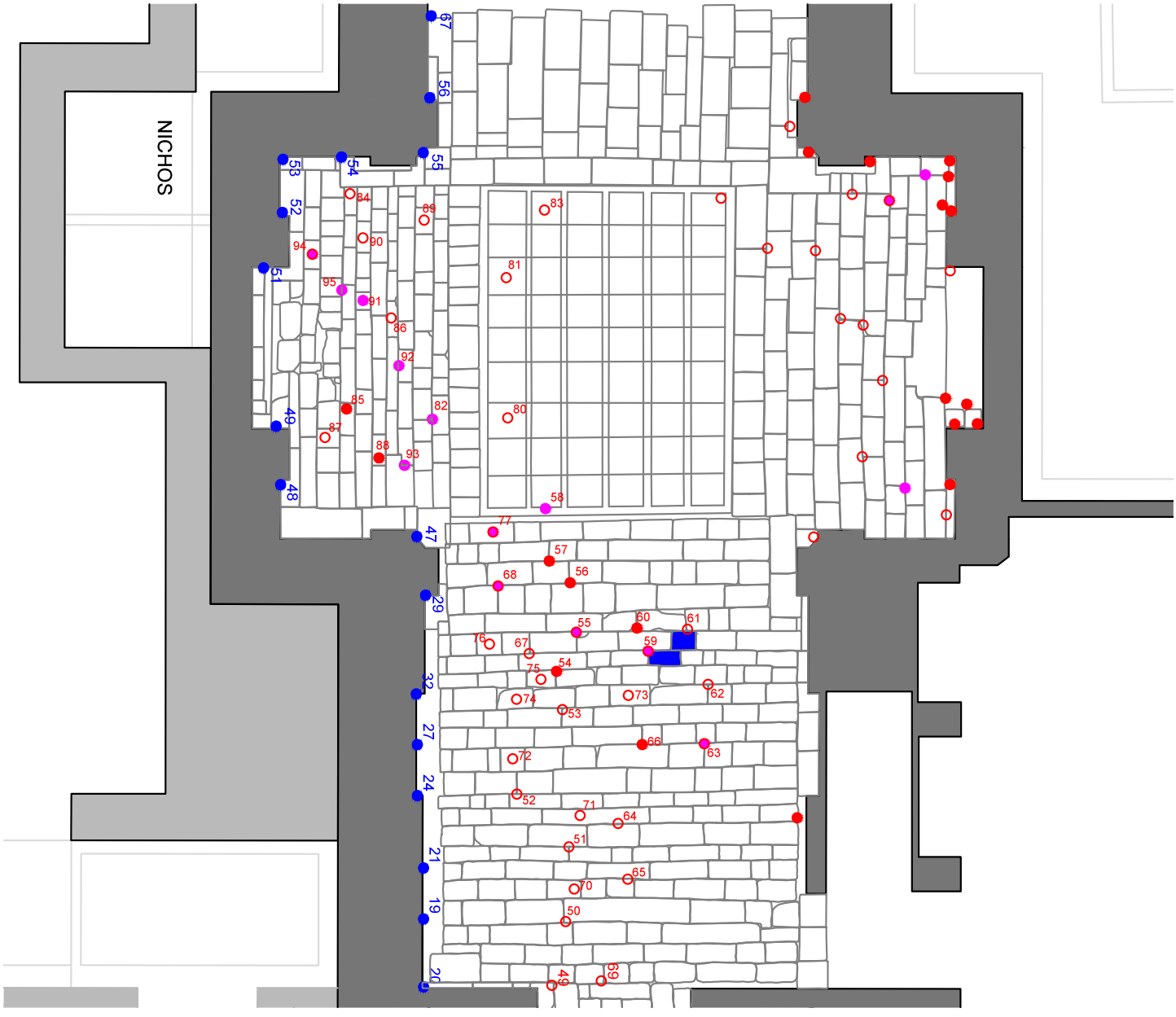


Figura 09. Plano de planta del pavimento en el que se representan los puntos de auscultación higrotérmica del día 18 de julio. En rojo y naranja los más intensos, y en azul oscuro los que tienen algo de evaporación por encima de la media. Los puntos sin relleno presentan una humedad más uniforme, poco significativa.

28

Con el fin de estimar la posible presencia de sales higroscópicas en el enlosado, se han hecho algunos puntos de caracterización de nitratos (indicados como "N") y cloruros (Cl), mediante tiras reactivas de *MERCK*.

La campaña de muestreo se inició el 6 de diciembre de 2014. Se han hecho primero 18 determinaciones de sales, sobre losas antiguas de la capilla, y sobre losas nuevas de la iglesia, próximas a la puerta de la capilla. El método empleado detecta las sales solubles en la superficie de piedra. Se hace humedeciendo en agua una pequeña papeta de celulosa, que succiona las sales superficiales de la piedra. Sobre ella se aplican los reactivos, y transcurridos unos segundos se obtienen los resultados. No se han tomado muestras de profundidad.

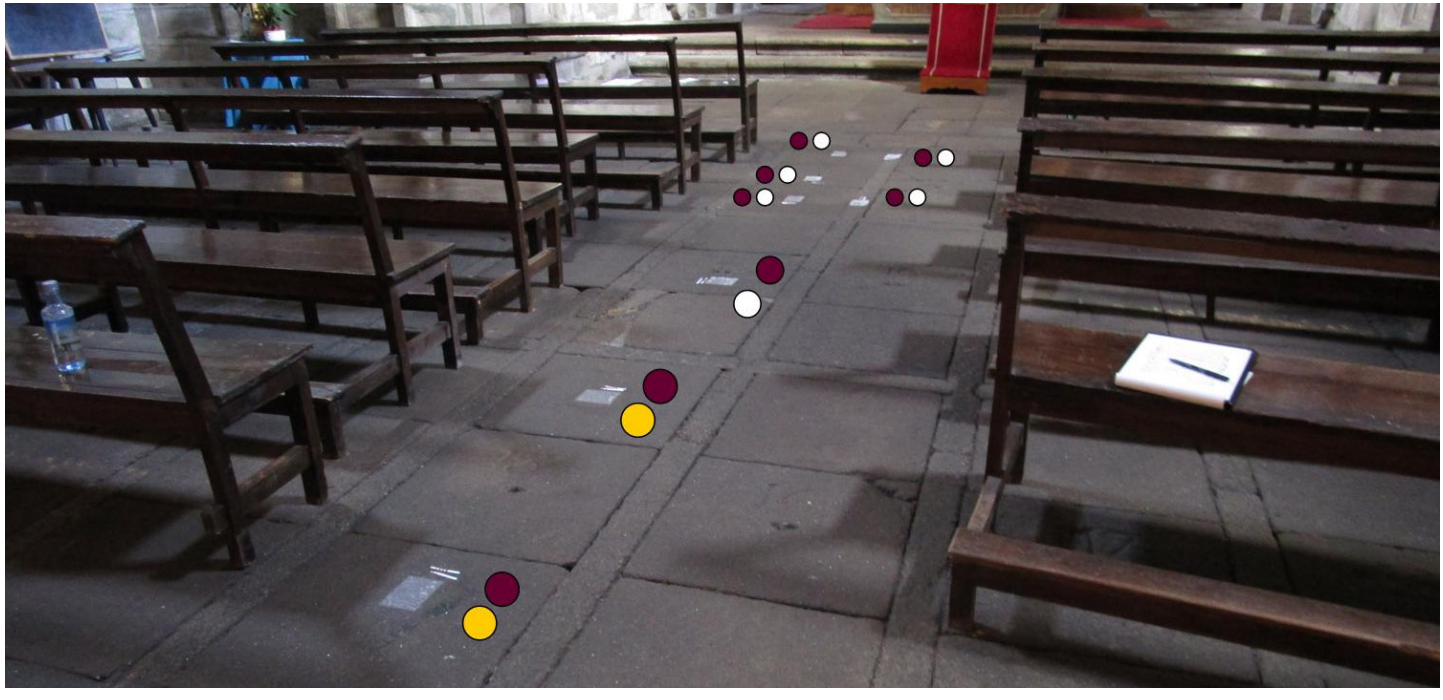
Los resultados se representan en la tabla siguiente, y sobre fotografías. los códigos de color representan diferentes "intensidades" de la presencia de la sal; aunque en ningún momento se ha pretendido que el ensayo sea cuantitativo, la forma de muestreo permite cierta aproximación.

Medición de sales mediante tiras reactivas sobre papeta de celulosa

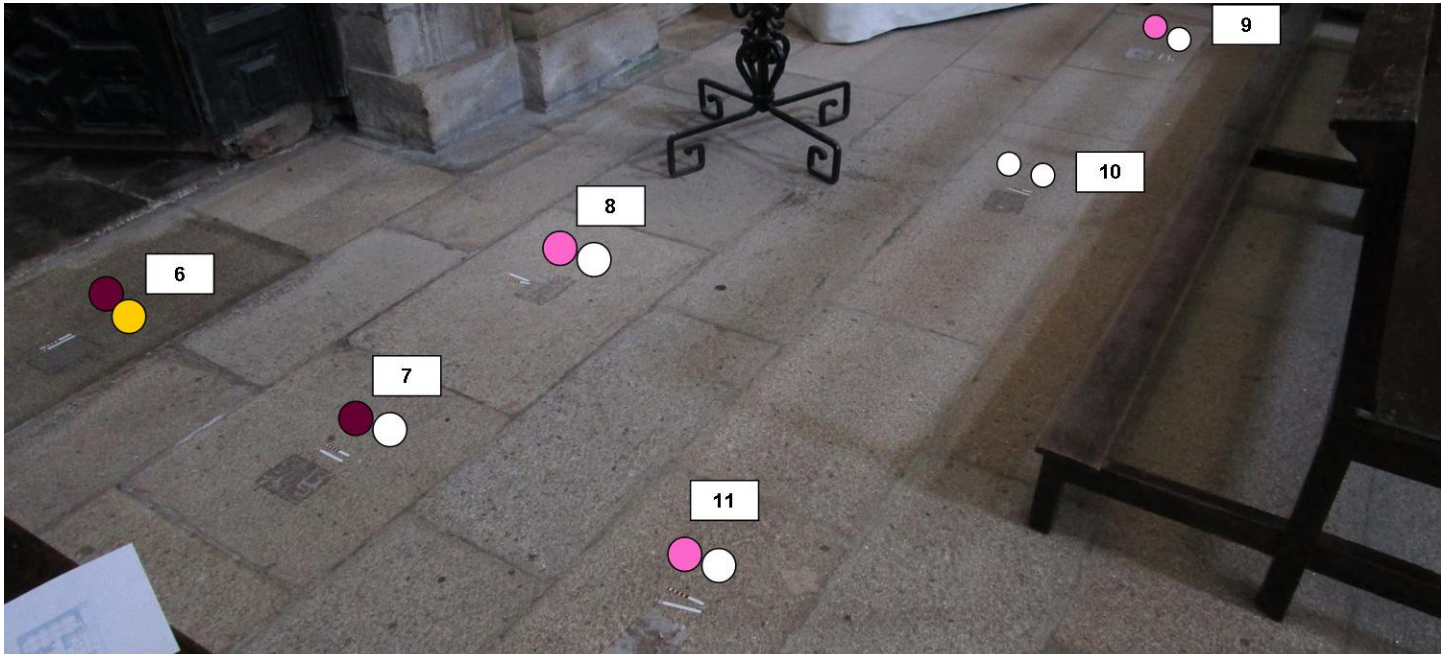
N			CL	Nivel
-			-	
?			?	ambiguo
x			x	bajo
xx			xx	medio
xxx			xxx	alto
			xxxx	muy alto

Nº	N		Cl		lápida	altura	mancha
1	++		--		3	suelo	si
2	++		--			suelo	si
3	++		--			suelo	si
4	++		--		Calle derecha de la 3	suelo	Si
5	++		--			suelo	Si
6	++		?		Antepuerta capilla	suelo	?
7	++		--			suelo	?
8	?		--			suelo	No
9	?		--		Otra zona de antepuerta	suelo	No
10	--		--			suelo	No
11	?		--			suelo	?
12	+		--		Nave iglesia	suelo	?
13	++		--		Nave iglesia	suelo	Si
14	+		?			suelo	?
15	?		--			suelo	No
16	++		?		9	suelo	Si
17	++		--		13	suelo	Si
18	++		?		13	suelo	si

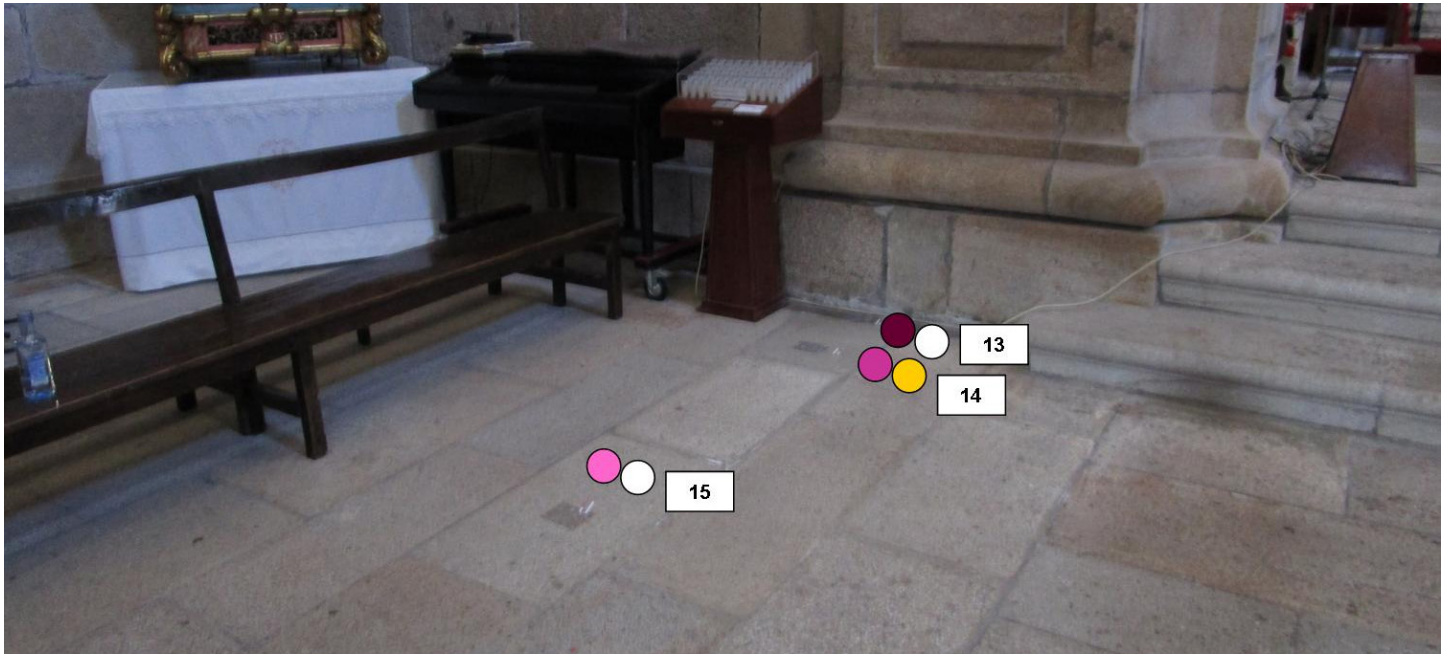
Cartografía de sales sobre enlosado en la nave de la capilla.



Cartografía de sales sobre enlosado en el acceso a la capilla desde la iglesia. Puede observarse que la contaminación llega hasta el crucero de ésta.



Cartografía de sales sobre enlosado en la iglesia.



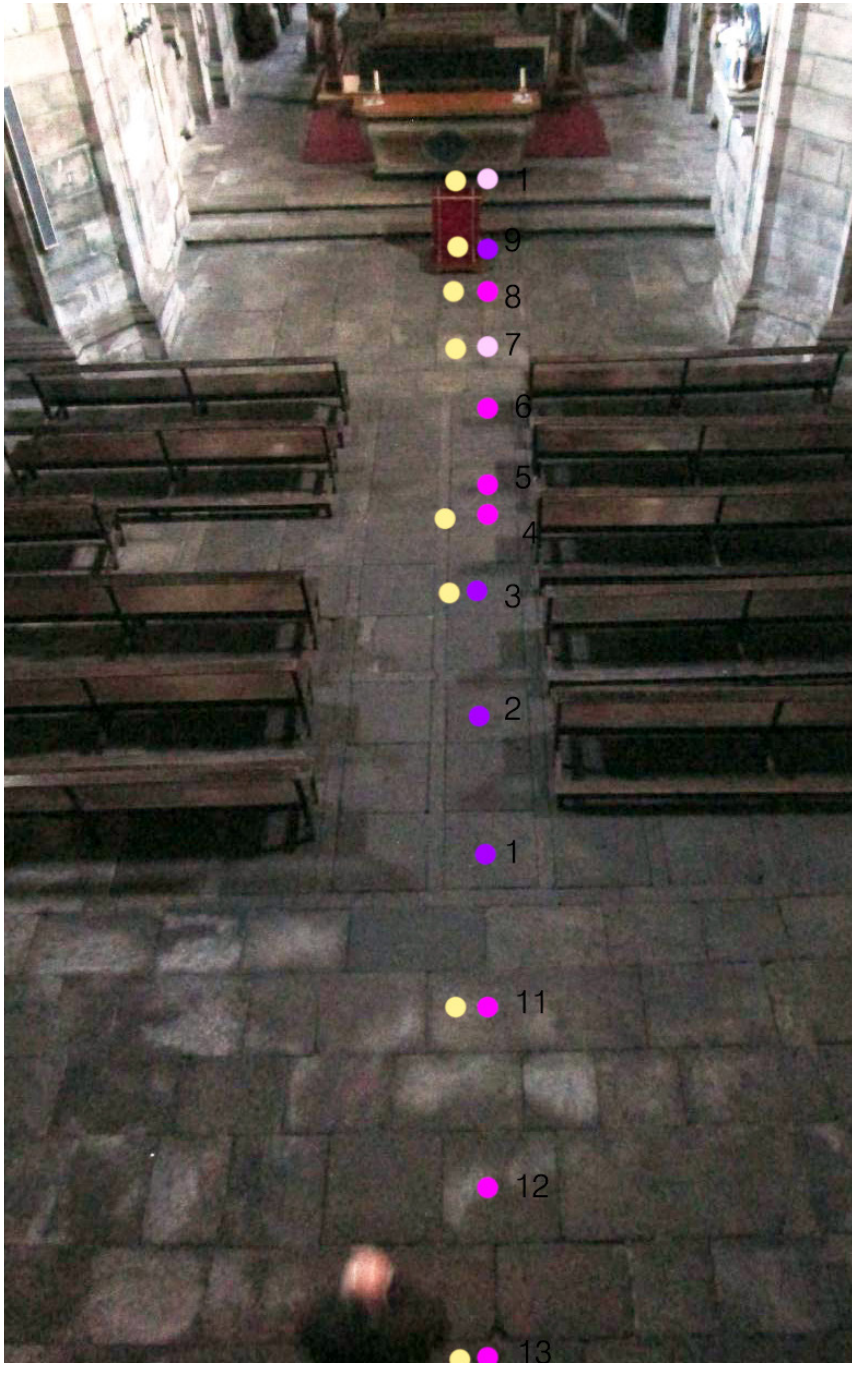
En el mes de marzo de 2015 se volvieron a hacer ensayos de determinación de sales. En el cuadro se muestran los valores obtenidos para nitratos (NO3), nitritos (NO2), y cloruros (Cl). En las cartografías no se muestran nitritos ya que no se encontraron en ninguna de las muestras tomadas.

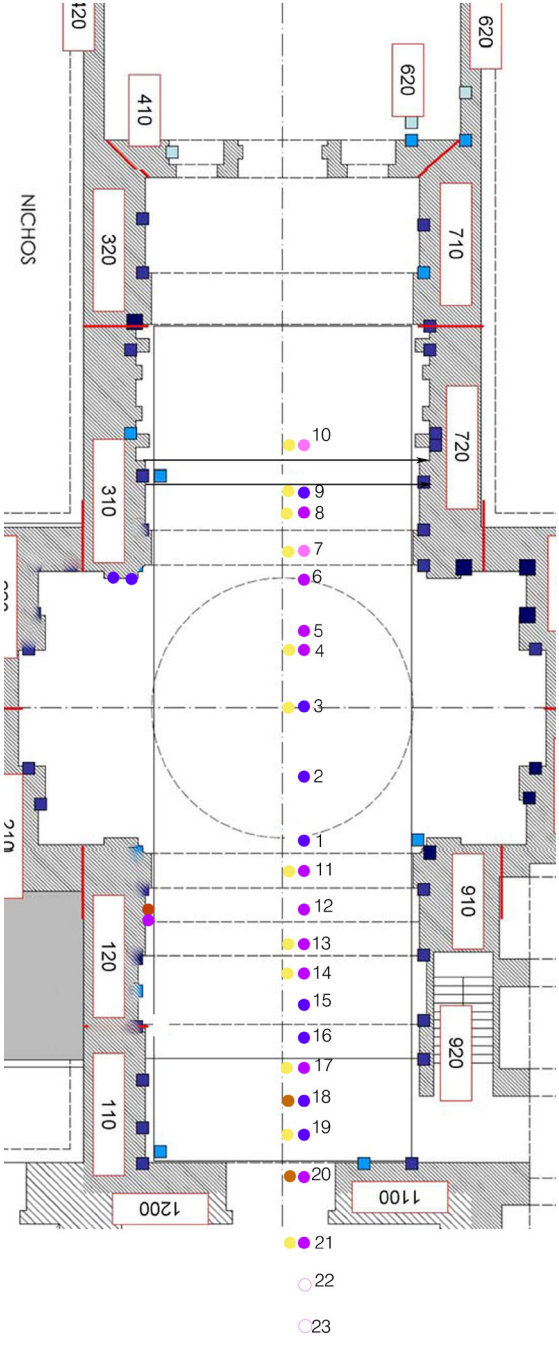
Resultados **sobre la superficie de las losas**

nº	Zona	posición	h	NO3		NO2	Cl		mancha	ANOTACIONES
1	16 inferior	losa	0	xxx		-	-		SI	Papeta en losa
2	16 superior	losa	0	xxx		-	-		SI	Papeta en losa
3	tumba 10	losa	0	xxx		-	?		SI	Papeta en losa
4	calle 1-10	calle	0	xx		-	x		SI	Papeta en calle
5	tumba 1 inf	losa	0	xx		-	-		SI	Papeta en losa
6	tumba 1 sup	losa	0	xx		-	-		SI	Papeta en losa
7		losa	0	x		-	?		irregular	mancha irregular hacia los bordes
8		losa	0	xx		-	x		SI	
9		losa	0	xxx		-	x		SI	
10	altar	losa	0	x		-	?		SI	parte superior escaleras, bajo altar
11	2ª fila	losa	0	xx		-	?		irregular	partes sin manchar
12	4ª fil	losa	0	xx		-	-		irregular	zonas secas-húmedas
13	6ªfila	losa	0	xx		-	?		SI	mancha uniforme
14	7ª fila	losa	0	xx		-	?		irregular	zonas secas-húmedas
15	10ª fila	losa	0	xxx		-	-		SI	mancha uniforme
16	12ª fila	losa	0	xxx		-	-		SI	
17	15ª fila	losa	0	xx		-	x		SI	
18	18ª fila	losa	0	xxx		-	xx x		SI	
19	21ª fila	losa	0	xxx		-	x		SI	
20	bajo puerta	losa	0	xx		-	xx x		SI	
21	1ª fila iglesia	losa	0	xx		-	x		irregular	mancha uniforme pero de baja intensidad
22	3ª fila iglesia	losa	0	-		-	-		NO	limpia
23	5ª fila iglesia	losa	0	-		-	-		NO	

N			CL	Nivel
-			-	
?			?	ambiguo
x			x	bajo
xx			xx	medio
xxx			xxx	alto
			xxxx	muy alto

Cartografía de sales sobre enlosado de la capilla.





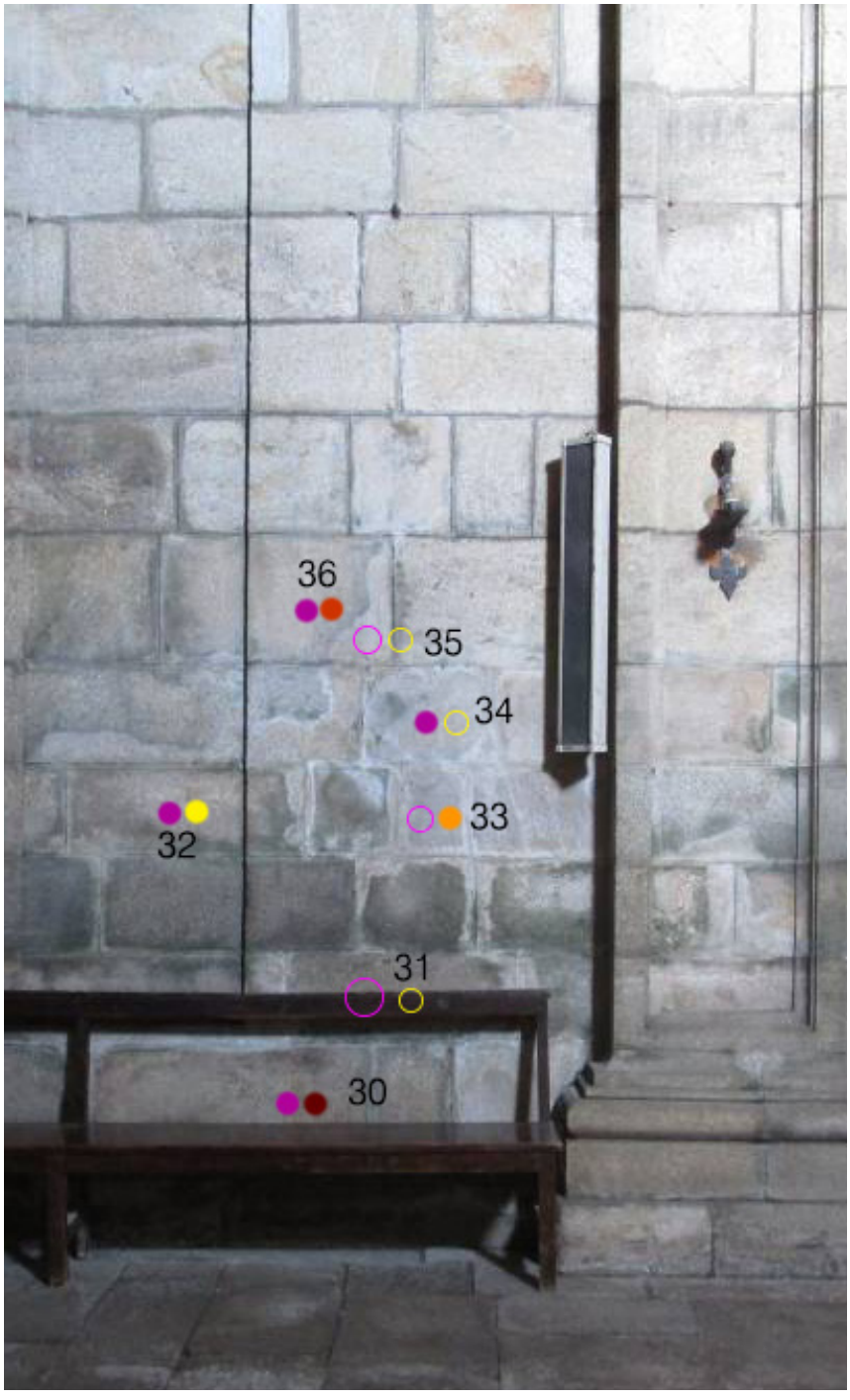
Se han hecho también ensayos relacionados con la **tierra bajo las losas,** que, curiosamente, está menos contaminada por nitratos (ver muestras 26, 27 y 28) que la superficie de la piedra. Tampoco hay cloruros. Estos datos llaman la atención y concuerdan con los resultados obtenidos en los ensayos hídricos, en los que se ve que la cara superior de las losas es más higroscópica que la inferior y que el terreno.

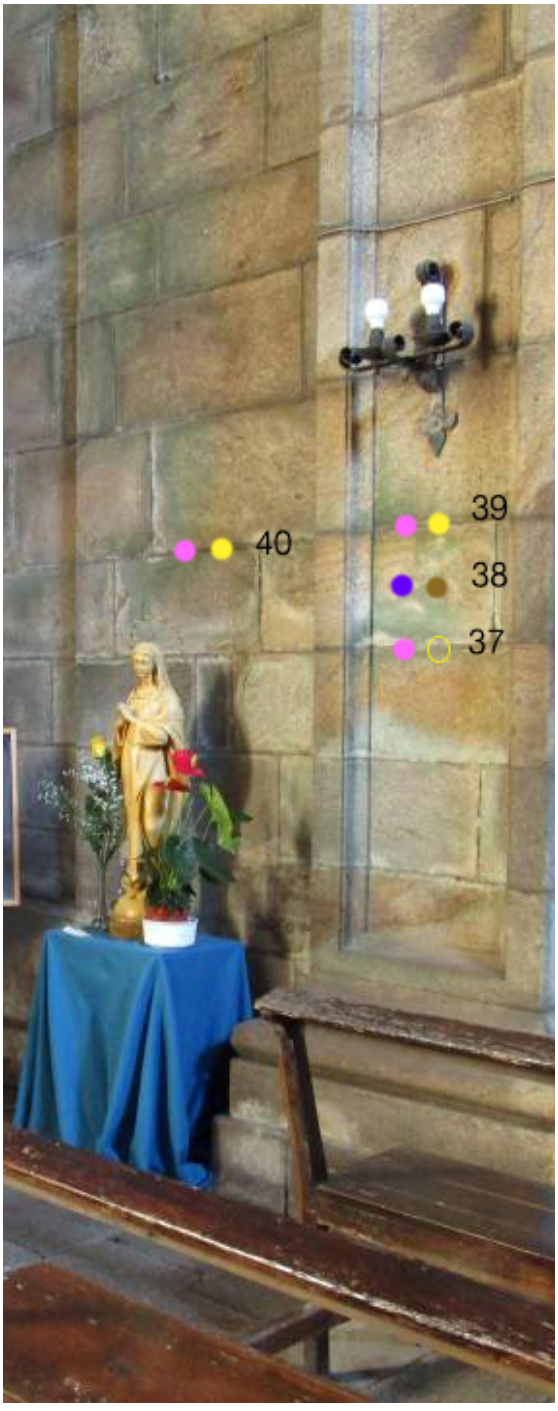
	LOSAS LEVANTADAS									
nº	**Zona**	**posición**	**H**	**NO3**		**NO2**	**Cl**		**mancha**	**ANOTACIONES**
24	LOSA 01		0	xxx		-	?		SI	Losa a la que se le dejó cámara ventilada por debajo
25	LOSA 02		0	xxx		-	?		SI	Losa a la que se le colocó plástico
26	TIERRA		-15	?		-	-			prueba en superficie
27			-15	?		-	-			prueba en vaso tierra
28			-15	?		-	-			prueba en vaso "ceniza"
29	tierra	tumba 14	-15	xxx		-	-			tierra tumba en vaso

Los resultados del estudio de **sales en los muros** se presentan en la tabla siguiente

	PARED									
nº	**Zona**	**posición**	**H**	**NO3**		**NO2**	**Cl**		**mancha**	**ANOTACIONES**
30	120	zócalo	20	xx		-	xxxx		no	encuentro zócalo-muro
31	120	muro	50	-		-	-		no	papeta
32	120	muro	100	xx		-	x		algas	muestra en papeta en mano
33	120	muro	100	-		-	xx		no	muestra en papeta en mano
34	120	muro	130	x		-	-		no	muestra en papeta en mano
35	120	muro	150	-		-	-		no	misma piedra en ambas muestras, pero la 35 donde no hay mancha y la 36 encima de las manchas blancas-verdosas
36	120	muro	150	xx		-	xxx		si	
37	310	junta	120	x		-	-		no	junta de cemento?
38	310	junta	150	x		-	x		no	junta superior
39	310	piedra	135	xx		-	xxx		algas	piedra entre juntas, colonizada
40	310	junta	150	x		-	x		no	junta contigua
41	coro	piedra mala	150	xx		-	x		si	manchas pardas, papeta en mano
42	coro	piedra buena	150	x		-	x		no	limpia totalmente, papeta en mano
43	coro	bajo zócalo	100	x		-	x		no	limpia totalmente, papeta en mano

N			CL	Nivel
-			-	
?			?	ambiguo
x			x	bajo
xx			xx	medio
xxx			xxx	alto
			xxxx	muy alto


36
35
34
33
32
31
30



Conclusiones del estudio de sales

- En general hay nitratos en las losas antiguas de la capilla y hay menos presencia (o ninguna) en las losas nuevas de la iglesia. Se esperaba la presencia de nitratos, pues se asocia a la materia orgánica y a las tumbas.

- No hay casi presencia de cloruros, ni en la capilla ni en la iglesia. Tan sólo han aparecido trazas en algunas de las losas. La zona más afectada parece estar cerca de la puerta que comunica con la iglesia

- Los pocos nitratos que se encuentran en las losas estudiadas de la iglesia disminuyen cuanto más nos alejamos de la puerta de la capilla, luego pueden ser contaminaciones llevadas al pavimento nuevo en los zapatos de los que pisan las losas de la capilla.

- Hay también contaminación en algunos sillares de la pared, aunque en paramentos verticales parece menor que la del pavimento. Los nitratos forman parte de una patina fina, oscura, que recubre la superficie de las losas por su cara superior.

- Se podría atribuir la higroscopicidad de las piedras, a la presencia de los nitratos, que son sales higroscópicas.

- El oscurecimiento de las piedras no es siempre equivalente a su nivel de contaminación.

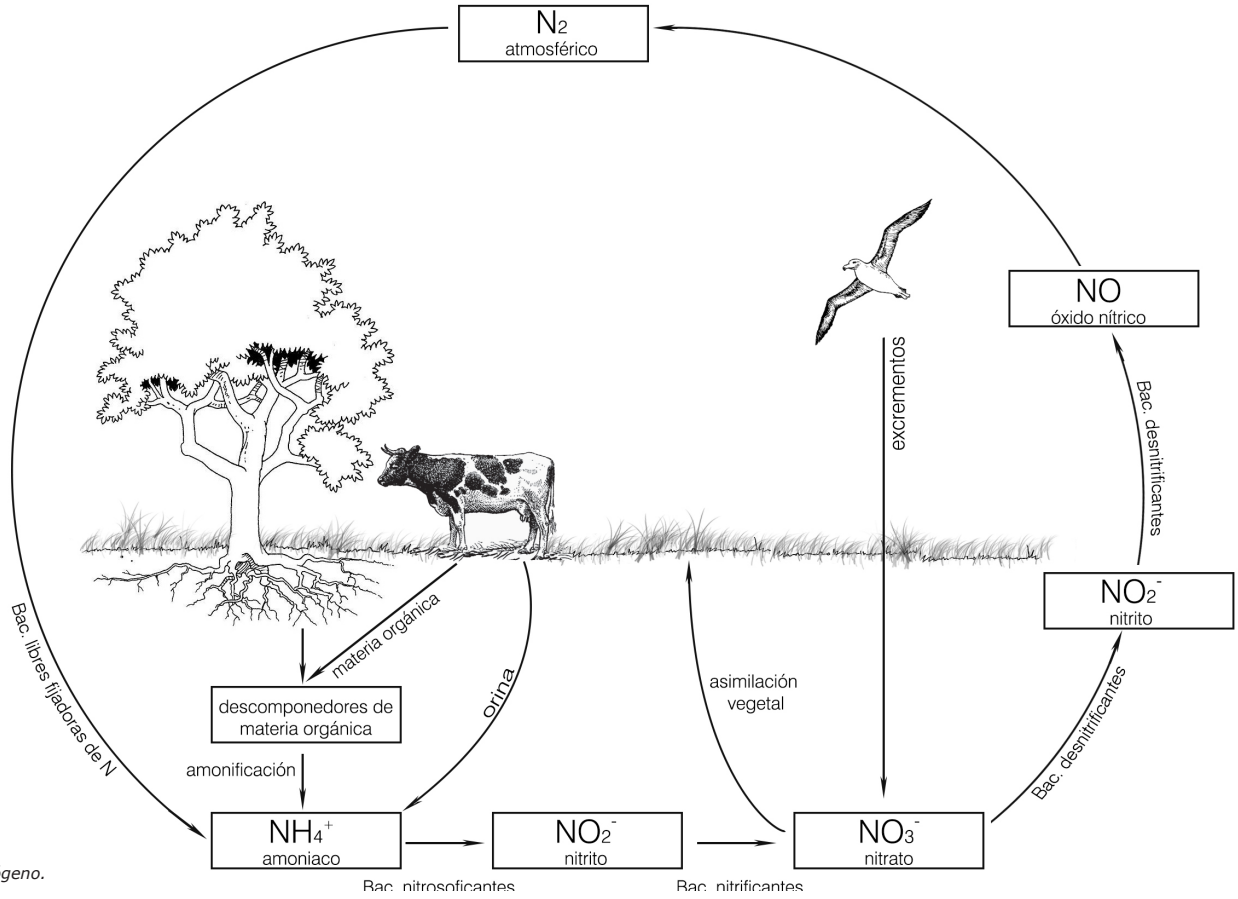
La presencia de nitratos es bastante frecuente en edificios de patrimonio. Por lo general la contaminación tiene relación con la presencia de materia orgánica en el entorno de los materiales, como de hecho se da en Conxo, pues el cementerio está pegado al muro Norte y el agua que empapa el cementerio, en su recorrido, necesita atravesar el obstáculo que éste interpone. Es normal que el agua de lluvia atraviese la zona de tumbas, arrastre los componentes orgánicos generados en ella y los transporte a la base de los muros e incluso al pavimento. Esta base de hipótesis, sin embargo, no explica de forma concreta cómo se han podido contaminar las losas, y por qué están más contaminadas en su superficie que en la base de las mismas.

Se ha planteado si los nitratos de las losas podrían tener un origen biológico. Para evaluar esta posibilidad, se ha empleado un método de diagnóstico que se basa en hacer análisis biológicos sobre la superficie de las losas, así como en la tierra que les sirve de base. El fundamento se apoya en que el proceso que da origen a la presencia de nitratos sobre las losas, partiendo del amoníaco (presente en los lixiviados que proceden de las tumbas cuando se moja la tierra con la lluvia), requiere la presencia de determinados organismos que transforman el amoníaco en NO2 y en NO3. El proceso total se conoce como "ciclo del nitrógeno". Desde el amoníaco determinadas bacterias pueden dar origen a nitratos y otras bacterias pueden, posteriormente, revertir el proceso, devolviendo el Nitrógeno a la atmósfera.

Los microorganismos que intervienen en las cuatro fases de este posible proceso serían:

- Bacterias libres fijadoras de N2: son las del género *Azotobacter* principalmente (fijan el N2 atmosférico en amonio).
- Bacterias nitrosoficantes: encargadas de reducir el NH4 en NO2: principalmente *Nitrosomononas* (transforman amonio en nitrito).
- Bacterias nitrificantes, encargadas de oxidar NO2 a NO3 (transforman nitrito a nitrato): el más usual es el género *Nitrobacter*.
- Bacterias desnitrificantes, encargadas de invertir el proceso anterior, pasando nitratos a su estado N2 gaseoso.

La investigación busca determinar la presencia de unas u otras en los materiales. Si se encuentran se podría determinar en qué estadio de la transformación se encuentran las losas, ver en qué parte del ciclo se encuentra, y por lo tanto se podría deducir el origen de la contaminación.

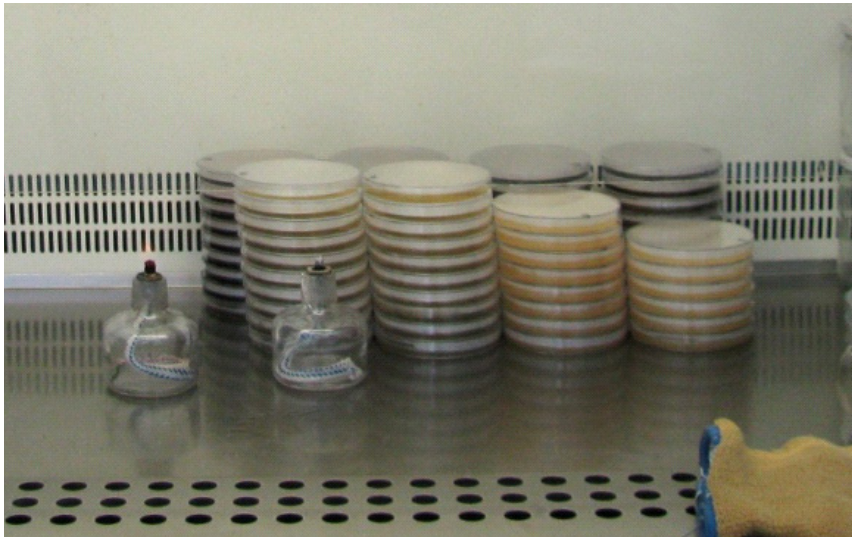


Ciclo del nitrógeno.

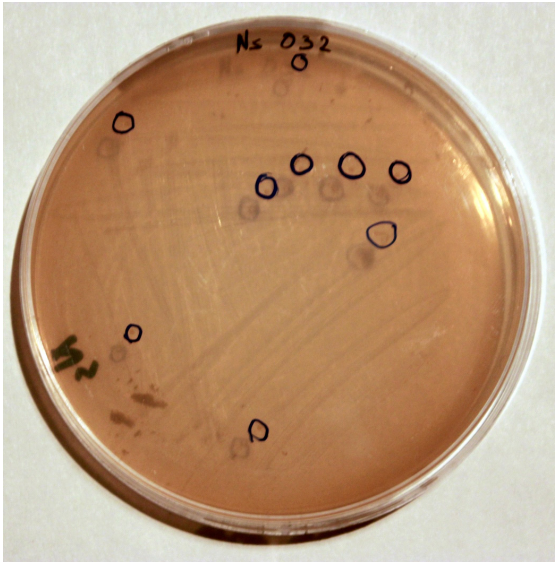
Método de ensayo

Se han hecho 30 tomas de muestras sobre la superficie de la piedra, tierra, etc. mediante torundas específicas, que se guardan luego en recipientes estancos y estériles. Las muestras se han tomado sobre las losas, pero también por la parte de debajo, e incluso en otras zonas de la capilla (paredes y coro). Sobre cada punto de muestreo se hacen cuatro muestras, cada una destinada al cultivo de un tipo u otro de las cuatro bacterias posibles, antes descritas.

Posteriormente se siembran las muestras sobre placas con caldos de cultivo específicamente preparados, y se colocan en incubación en las condiciones de temperatura adecuada para favorecer el desarrollo de las bacterias, si las hubiera.



Al cabo del tiempo preciso, se observan las placas de cultivo y se establecen las colonias que se hayan podido desarrollar.



Muestra 32 tras ser incubada.

lugar	núm.	muestra	medio	resultado	observaciones
losa 01 superficial	1	11	Az	-	
		12	Ns	-	-
		13	Ni	-	Inservible, se secó durante el ensayo
		14	D	+	Colonia pequeña
losa 02 superior	2	21	Az	-	
		22	Ns	+	dos colonias individuales pequeñas
		23	Ni	-	-
		24	D	+	colonias pequeñas
tierra bajo losa 02	3	31	Az	+	colonia pequeña
		32	Ns	+	colonias individuales y una colectiva
		33	Ni	-	
		34	D	-	
tierra tumba 14	4	41	Ni	-	
		42	D	-	
algas verdes esquina	5	51	Az	-	
		52	Ns	-	
		53	Ni	-	
		54	D	+	colonia pequeña colectiva
coro, piedra manchada	6	61	Az	-	
		62	Ns	-	
		63	Ni	-	
		64	D	-	
pilastra 120, algas	7	71	Az	-	
		72	Ni	-	
		73	Ns	-	
		74	D	+	Colonias pequeñas
Varias pared	X	x1	Az	-	
		x2	D	-	
		x3	Az	-	Contaminado por hongo
		x4	Ni	-	

Az – Género *Azotobacter* – fijadoras libres de N2 (fijan N2 en amonio)
Ns – *Nitrosomononas* – oxidadoras de amonio, o nitrosoficantes (producen Nitrito)
Ni – *Nitrobacter* – nitrificantes (producen nitratos)
D – Desnitrificantes (invierten el proceso, liberando N2 a partir de nitritos)

Comentario a los resultados

Se observa que las pocas colonias que crecen se dan en el enlosado y en su parte inferior. Al estar creciendo bacterias del género *Nitrosomononas* se confirma que está llegando Amonio por ascenso capilar a la base de apoyo del enlosado, y que este llega incluso hasta la superficie. Esto explica que la fuente de nitratos es el ascenso capilar en forma de amonio y oxidándose en sales en la piedra.

La pequeña cantidad de microorganismos encontrados, así como la ausencia de nitritos habiendo encontrado bacterias que lo producen, son indicadores de que la cantidad actual de amonio que llega a la superficie es mínima y que el proceso está detenido. Es decir, las sales que hay son todas actualmente por depósito a lo largo de los años.

La fuente más inmediata de amonio son los cuerpos en descomposición del cementerio situado en el norte de la parcela, en la parte alta de la capilla y que, siguiendo la escorrentía, el agua arrastra por debajo del enlosado.

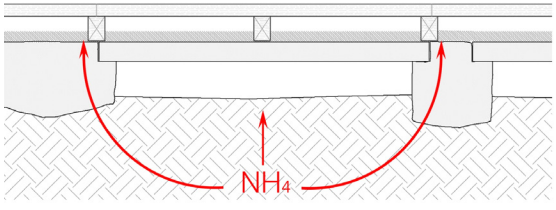
Discusión

Para dar una explicación al problema, a continuación se explica el proceso a través del cual el enlosado ha llegado al estado actual de contaminación higroscópica y de oscurecimiento debido a la humedad.

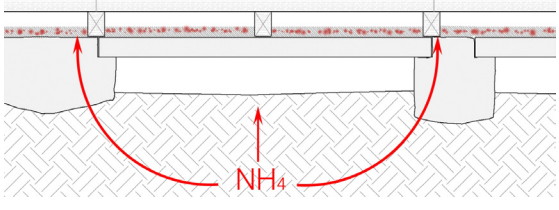
- Inicialmente las cenizas se encontraban en la superficie del enlosado, cubriéndolo en su totalidad. A este hecho hay que sumarle la aportación de amonio por capilaridad debido a la escorrentía del agua desde el cementerio anexo.

- Las cenizas vegetales poseen un PH muy elevado y esto provoca que el amonio se adhiera a las partículas de las cenizas o de la piedra con que están en contacto. De este modo el amonio se reparte por toda la superficie, incluso en las zonas donde no existe contacto capilar, como

Estado inicial: el amonio llega por capilaridad.



El amonio se extiende por toda la superficie a través de las cenizas.

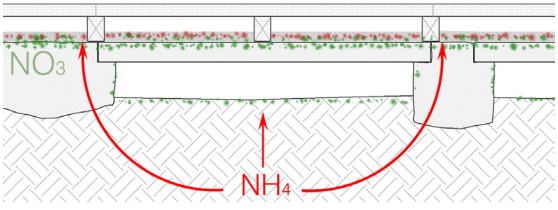


se muestra en las figuras. El amonio se acumula por toda la superficie de las cenizas.

- Una vez fijado el amonio por toda la superficie del enlosado debido a las cenizas, es posteriormente oxidado a nitrito por parte de las bacterias que intervienen en el ciclo del nitrógeno. En primer lugar se oxida el amonio a nitrito, y finalmente a nitratos en el proceso conocido como nitrificación. Este proceso además de colmatar la superficie porosa del material de sales, provoca la degradación del granito .
Además, algunos estudios han demostrado que el hecho de que haya cenizas sumado a un aporte de amonio multiplica notablemente la producción de nitratos.

- Finalmente, las bacterias nitrifican el amonio en nitratos que se depositan en la superficie del enlosado.
Tras la retirada del entarimado de madera y de las cenizas que cubrían el enlosado, los poros de la piedra quedaron colmatados de sales de nitrato y de partículas de ceniza que hacen que la higroscopicidad del material se dispare, provocando el oscurecimiento del pavimento en los meses con mayor humedad.

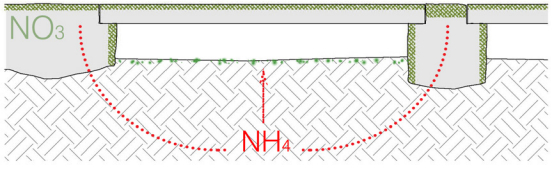
El amonio es transformado en nitratos por microorganismos.



- Mediante las mediciones higrotérmicas se comprueba que el edificio está evaporando poco y, concretamente, al enlosado le cuesta más evaporar que a los muros. Como se explicó, esto puede ser debido a una propiedad hidrófuga de las cenizas que colmatan los poros superficiales del enlosado que dificultan la correcta evaporación del material.

Estado actual del enlosado.

Estado actual: la aportación de amonio es mínima y el enlosado se encuentra contaminado por nitratos.



Actualmente, la aportación de amonio desde el subsuelo es mínima, ya que la atajea perimetral impide el paso de agua contaminada bajo la capilla y apenas se están produciendo procesos de oxidación de éste, por lo que todas las sales presentes en las piedras son de años de acumulación.

Objetivos del ensayo y disposición de los sensores

La *monitorización higrotérmica* es un tipo es estudio que hace un seguimiento de temperatura y humedad en algunos puntos de un edificio, con el fin de estudiar algún factor que requiera seguimiento.

En este caso, el diseño experimental se basa en la instalación de cuatro sensores, adquiridos por el Consorcio de Santiago, en cuatro puntos que se han seleccionado para resolver las siguientes cuestiones:

- ¿Cómo evapora, a lo largo del tiempo, uno de los focos detectados en la inspección higrotérmica? ¿El edificio evapora de forma distinta en los diferentes meses del año? ¿Llega a secar en algún momento?

- ¿La evaporación procedente de este foco se difunde por toda la capilla?. ¿Hay gradiente de humedad en ella?

- ¿Puede haber riesgo de que se produzcan condensaciones en la capilla, debido a la evaporación del pavimento?

Figura 10. Sensor 2 estación meteorológica

Figura 11. Sensor 3 y 4 en rincón muro 810

Para ello, se han dispuesto cuatro sensores de la siguiente forma:

– El sensor número 4 (Fig. 11), se colocó en el suelo, en el rincón del muro que denominamos como 810, que es uno de los puntos en los que se había medido mayor intensidad de evaporación, durante la inspección higrotérmica.
– El sensor número 3 (Fig.11), se colocó sobre el asiento de una silla, separado unos 50 cm del anterior. Su objetivo es comparar si hay mucha diferencia entre los valores del rincón -que miden directamente el foco- y los que se obtienen a cierta distancia.
– El sensor número 1 se colocó en la cornisa del edificio, a la que se accede desde el coro, para tener un registro de valores de humedad ambiente en altura.
–El sensor número 2 cumple las funciones de estación meteorológica, midiendo el ambiente exterior del edificio, que sirve para comparar los valores interiores con los del aire exterior. Este sensor se coloca de modo que quede protegido de la lluvia, en la ventana del coro hacia el muro Norte.

Equipos propiedad del Consorcio de Santiago

Los cuatro sensores colocados en la Capilla están "alineados" según una línea virtual que va desde el rincón del foco hasta la ventana. Como el aire húmedo tiende a subir, y como la ventilación se produce hasta las ventanas, se pretende obtener información sobre el *gradiente* desde un punto húmedo hasta un punto lo más seco posible al estar cerca de una ventana.

Los sensores se han programado para tomar una lectura cada hora, pues en edificios como éste, sin calefacción y con gran masa térmica, las variaciones son pequeñas a lo largo del día. Los datos se transmiten por la web hasta una página de la que se pueden descargar.

Con los datos descargados, se elaboró un fichero que permitió estudios estadísticos, además se pasaron los datos a ábacos psicrométricos, para visualizar la evolución.

A la vista de los resultados que se iban obteniendo, se decidió centrar el estudio en los datos que se obtenían de los sensores 2 y 4 (el ambiente exterior y el aparato colocado en el rincón húmedo), que resultaban ser los que ofrecían datos más representativos, por lo que se ha procede a un análisis más exhaustivo de estos.

Se eligió como punto para monitorizar el rincón SE del crucero de la Capilla, pues en todas las inspecciones higrotérmicas que se hicieron, ese resultaba siempre el punto donde se medía más evaporación. Las zonas de más evaporación han correspondido siempre a las que, en los planos, se denominaron como zonas 810, 820 y 720. (Fig.02)

En esas zonas se veía cómo la humedad tenía un gradiente "de abajo a arriba", aunque sorprendentemente se medía evaporación bastante significativa también en altura, lo cual nos llamó la atención desde el principio. En las fotografías de las figuras 2 a 12 se puede observar cómo la evaporación en los distintos focos no tiene la misma intensidad a lo largo de los meses, pero siempre hay algo

Conclusiones de la monitorización higrotérmica

- Las condiciones de humedad y temperatura en el interior de la capilla son bastante constantes a lo largo de un período corto de tiempo (un día, e incluso una semana). Los gráficos analizados mostraban ya la **inercia térmica e hídrica** del edificio, que le lleva a mantener de forma bastante constante la humedad y la temperatura a lo largo de un día.

- Otra conclusión que ya se extraía era que no hay grandes diferencias entre los valores que se miden en el suelo y a la altura del coro. Esto muestra que **la ventilación es escasa**. En general, la apariencia de los datos era que **en invierno no hay mucha evaporación**, a pesar de la humedad que afecta a la capilla y que la humedad se difunde lentamente por toda la capilla, de forma bastante uniforme.

Figura 12. Sensor 1 sobre la cornisa del coro

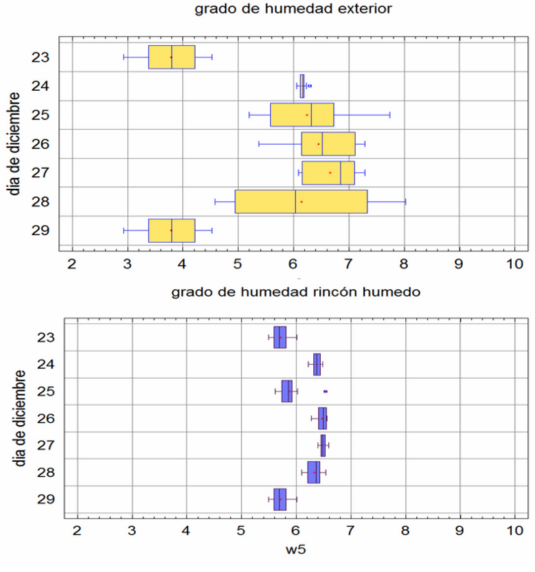
Cuando no hay evaporación, puede ser por dos factores:

a. Porque no haya humedad en el punto monitorizado.

b. Porque no haya condiciones adecuadas para que el punto evapore y seque.

En el caso de la Capilla se habían detectado puntos con humedad en la base del muro, por lo que se descarta la primera opción. Se ha elegido, como ya se ha comentado, para hacer el seguimiento, uno de los puntos más húmedos de la Capilla, que fue localizado en las inspecciones higrotérmicas.

Respecto a las condiciones climáticas, los valores de humedad monitorizados hablan de un clima exterior bastante húmedo, que no favorece la evaporación la mayor parte del tiempo. Las condiciones exteriores en invierno son de una humedad relativa que oscila entre el 80 y el 100%, con grados de humedad muy altos. Todo ello indica que, aunque el edificio estuviera más ventilado, no se resolvería el problema de su falta de evaporación, pues la toma de aire exterior puede ser, en bastantes momentos, perjudicial, el aire en el exterior muchas veces está más húmedo que el del interior de la Capilla. Por lo tanto, parece que en invierno el edificio, aunque húmedo en muchos puntos, no puede evaporar porque las condiciones exteriores no lo facilitan, y porque tampoco hay ventilación para los momentos en los que ésta sería beneficiosa. Estos momentos son escasos que no son tantos, pues en gran parte del tiempo no es conveniente ventilar, en invierno, por las condiciones del aire exterior.



Continuando el estudio hasta el mes de junio, se ha elegido una semana representativa de cada mes, para hacer un estudio detallado de:

- Las variaciones de humedad en el exterior y el interior. Dado que se ha venido comprobando que hay muy poca diferencia de grado de humedad entre el "rincón", el ambiente interior cercano, y el coro, se ha

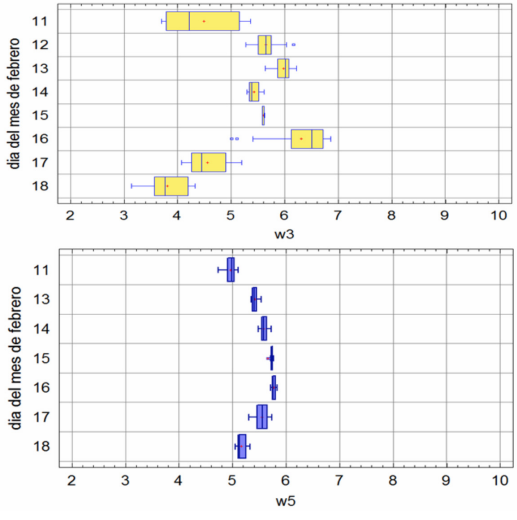
optado por hacer el seguimiento comparativo tan sólo de los puntos 4 rincón, y 2 exterior, hasta que no cambien las condiciones, y el edificio empiece a secar de forma diferencial.

- Los ábacos psicrométricos de todos los aparatos, medidos día a día en la semana elegida de cada mes

Los resultados se han analizado estadísticamente; los primeros gráficos que se presentan son los diagramas "box and wiskers", que representan la dispersión de los valores de humedad, dia a día, en la semana elegida. Cuando más alargada es la caja, mayor es la desviación de los valores de humedad en el día elegido. El gráfico incluye el valor medio, señalado como una línea.

Los gráficos de color amarillo corresponden al aparato 2 del exterior, y los azules pertenecen al aparato 4 colocado en el rincón de la Capilla. Se puede ver cómo hay días en los que la variación de humedad en el exterior es grande, por ejemplo, el día 28 de diciembre, mientras que en otros casi no hay variación de humedad (día 24 de diciembre). Hay días más secos como el día 23 y el 29, por ejemplo, en los que el grado de humedad medio exterior oscilaba entre 3,5 y 4,2 g/kg. el día más húmedo parece el 27, con una media de grado de humedad de 6,8 g/kg.

Pues bien, los valores de grado de humedad (W) del rincón monitorizado, en estos mismos días, tienen una variabilidad mucho más reducida, las cajas correspondientes en el gráfico son pequeñas, y no muestran muchas diferencias de un día a otro: los días más secos tienen una humedad de 5,8 g/kg de media, mientras que en los más húmedos es de 6,4 - 6,5 g/kg. Parece que hay cierta correlación entre interior y exterior, en el sentido de que los días más húmedos exteriores se corresponden con los más húmedos interiores, pero no es una influencia que haga variar demasiado el interior. Es como si la capilla tuviera cierta inercia hídrica.

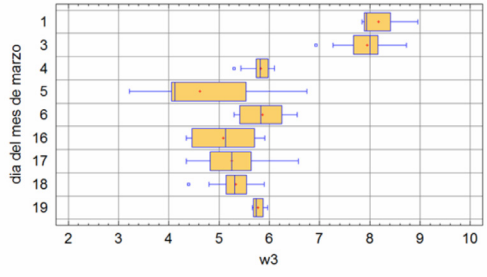


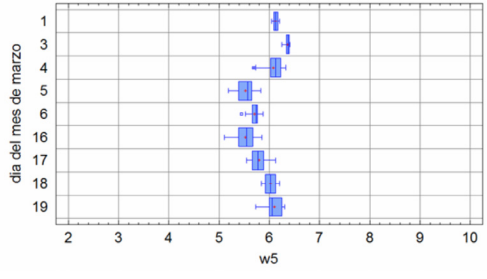
Como se ve, el mes de febrero ha sido más seco que el de diciembre, tanto en el exterior como en el interior de la Capilla, lo cual podríamos considerarlo normal, puesto que el invierno el aire está más seco (de forma absoluta, no en humedad relativa) que en el resto del año. Se aprecian unos gráficos similares a los de diciembre, en lo que respecta a la variación respectiva de la humedad en el interior y el exterior. Se sigue mostrando cierta inercia hídrica en el interior.

El día 16 de febrero de 2015 la humedad exterior fue mayor al haber lluvias desde el día 14 al 16 y se aprecia cierta influencia sobre el punto del interior, cuya humedad alcanzó valores de 5,8 g/kg

En el mes de marzo de 2015, tan sólo 20 días más tarde, que los de febrero los valores anotados corresponden a los días en los que se han podido aprovechar las medidas obtenidas por los data-loggers, y van desde el día 1 al 19.

Se puede apreciar que, los primeros días ha habido una gran variación en las condiciones ambientales que se reflejan en las gráficas, con grados de humedad altos en el exterior. Los tres primeros días fueron de lluvia intensa en bastantes puntos de Galicia. Esto se manifiesta en los datos, pues se alcanzan valores que superan los 8 g/kg en el exterior. En esos días la humedad exterior fue mucho más alta que la del interior de la Capilla, que se mantuvo entre 6,2 - 6,4 g/kg. Todo esto parece que sigue ratificando la observación de que no hay una influencia directa entre la lluvia exterior y la evaporación que se mide en el rincón de la Capilla.





El resto del mes ha sido seco en toda Galicia, y esto se nota también en los registros obtenidos por los data-loggers.Según datos meteorológicos de Galicia, el mes de abril, como el de marzo, resultó seco en toda la Comunidad. Las precipitaciones más importantes se registraron durante la segunda quincena, especialmente los días 25 y 30 cuando en distintas estaciones de Rías Baixas y Costa da Morte llegaron a superarse ampliamente en 24 horas los 40-50 l/m2. Se registraron

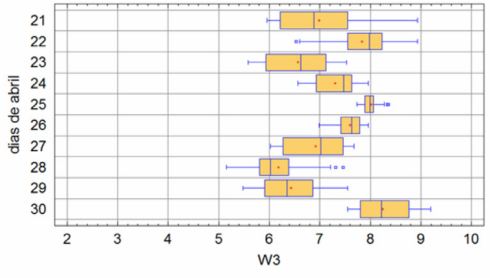
tormentas un total de 10 días, cifra que podemos considerar normal para un mes de abril en Galicia. Destacan las registradas el día 21 que afectaron principalmente a la mitad occidental de la Comunidad y llegaron a acumularse cantidades entre 12 y 15 l/m2 en media hora en estaciones del oeste de Ourense e interior de A Coruña y Pontevedra.

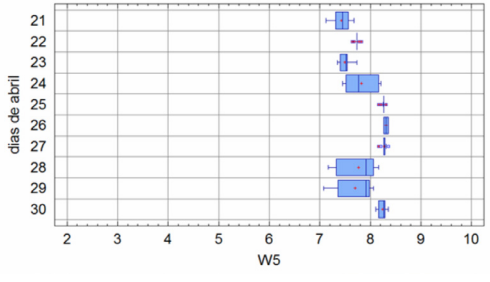
Los datos recogidos por los data-loggers han mostrado un aumento del grado de humedad (W) en el exterior y el interior del edificio. Los valores exteriores medios oscilaron entre 6,6 y 8 g/kg, y los del interior mostraron un aumento significativo, oscilando entre 7,5 y 8,3 g/kg de media.

En general, se nota un aumento significativo del grado de humedad, y la influencia acumulada de la lluvia.

El mes de mayo resultó también algo inferior en precipitaciones, de lo que es habitual en Galicia. Los días más lluviosos fueron los primeros del mes. Esto se detecta también en los datos recogidos por los data-loggers en Conxo, pues el grado de humedad exterior en esos días osciló alrededor de 9 g/kg. El resto de los días estudiados osciló entre 6 y 8,5 g/kg. El aire en primavera es más húmedo que en invierno, cosa que es normal y ya se ha comentado más arriba.

En el interior de la capilla los valores permanecieron por encima de 8 g/kg la mayor parte de los días. Se nota que el edificio se ha cargado de humedad y trata de "evaporar". Si consideramos que para poder hacerlo de forma constante el grado de humedad exterior tiene que ser menor que el grado de humedad interior, para que se den condiciones de presión de vapor positiva, esto sólo se podría producir en pocos días: básicamente, el 5 y el 6, y tal vez algo en el 7. En el resto de los días, sólo se produce evaporación en algunas horas del día.
Por último se analizan los valores del mes de junio de 2015, hasta el día 15. En este mes, las precipitaciones en Santiago de Compostela han sido escasas, y los días más significativos han sido el 12 y el 14. Esto no se aprecia bien en los valores registrados por los aparatos, que





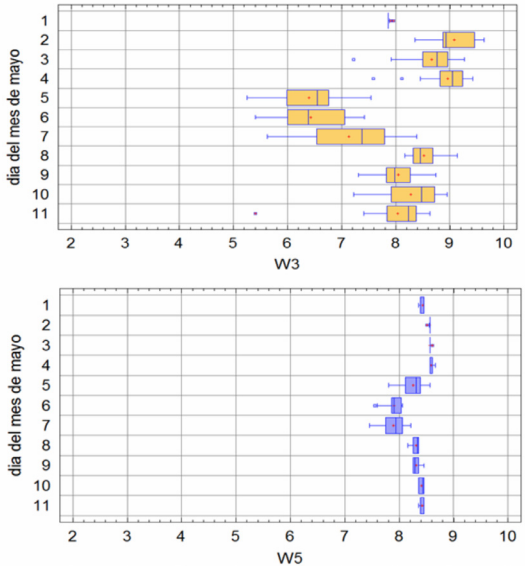
han sido bastante altos sobre todo los primeros 9 días, con grados de humedad medios entre 8,2 y 10,2 g/kg.

En el interior de la capilla, los valores han sido también muy altos, entre 9 y 10 g/kg.

Es significativo el aumento, en junio, de los días con posibilidad de una evaporación constante (días 2, 9, 10, 11, 12, 13, 14 y 15, de los medidos, y también bastante probable el 5 y el 6). Se deduce, por lo tanto, que es en estos momentos del mes de junio cuando el edificio puede respirar, evaporando la humedad que pudiera tener retenida en sus elementos constructivos.

Para terminar de visualizar el comportamiento de la capilla en estos meses, se han hecho unos gráficos-resumen. En el primero (Fig. 13) se muestra la evolución mes a mes. Se puede ver cómo el aire exterior y el interior siguen curvas parecidas, en el sentido de que hay menos humedad absoluta en el aire en invierno que en junio. El mes en el que el aire es más "seco" ha sido febrero, con una media de grado de humedad de 5,4 g/kg. Sin embargo, las estaciones meteorológicas han dado unos 20 días de lluvia en este mes, lo cual indica que la cantidad de vapor que realmente permanece en el aire no sólo depende de la cantidad de agua caída, sino de la temperatura. A medida que llega la primavera, y la temperatura aumenta, lo hace también el grado de humedad del aire, que llega a una media de 8,5 g/kg en junio.

Figura 13. Evolución mensual



Respecto al interior de la Capilla, se observa un comportamiento similar: hay menos grado de humedad en el aire en febrero 5,5 g/kg que en junio 9,3 g/kg. Es en esta época cuando la capilla debe secar de forma más eficaz, como ya se ha comentado antes.

La evolución anual del grado de humedad se ve en la figura 13.
Se pueden comentar varias cosas, sobre estos gráficos:

- El mes más seco, en el exterior, es febrero, y a partir de marzo se

produce un aumento de humedad general, que puede corresponder al principio de las lluvias. En el interior el aumento viene un poco retrasado (se produce entre marzo y abril): tal vez cuando el agua de lluvia llega al interior del edificio.

- El mes en el que hay mayor grado de humedad en el aire es julio. Esto es normal en todos los climas de España, pues la cantidad de humedad que el aire puede contener aumenta con la temperatura. En el interior de la capilla la humedad más alta se mantiene todo el verano, y es el momento en el que hay un poco más de diferencia entre interior y exterior: es como si el edificio tratara de evaporar un poco más en verano.

- Parece que, igual que hay un poco de retraso en la aparición de la humedad en el interior, respecto a las lluvias, también hay un poco de retraso en el secado de verano.

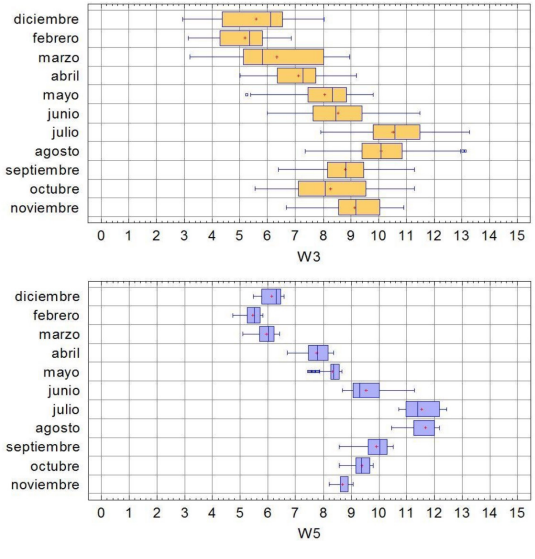
Comportamiento higrotérmico global de la Capilla

Con los resultados del análisis de los datos de los data-logger durante todo el año de estudio, se ha podido elaborar una teoría sobre cómo es el comportamiento higrotérmico de la Capilla.

La evolución de la capilla se puede seguir en los ábacos psicrométricos. En el gráfico siguiente se ve la evolución del punto 810, cuyo sensor hemos denominado 4.

Hay una correlación entre el grado de humedad y la temperatura, a lo largo del año (Fig.14). La humedad relativa en ese punto supera el 80% de forma casi permanente. Las nubes de puntos, a partir del mes de abril, no tienen buena precisión, pues los sensores de temperatura dejan de medir con decimales, y eso enmascara los datos. A pesar de todo, se ve una buena correlación.

Si simplificamos los datos anteriores, y los superponemos sobre los

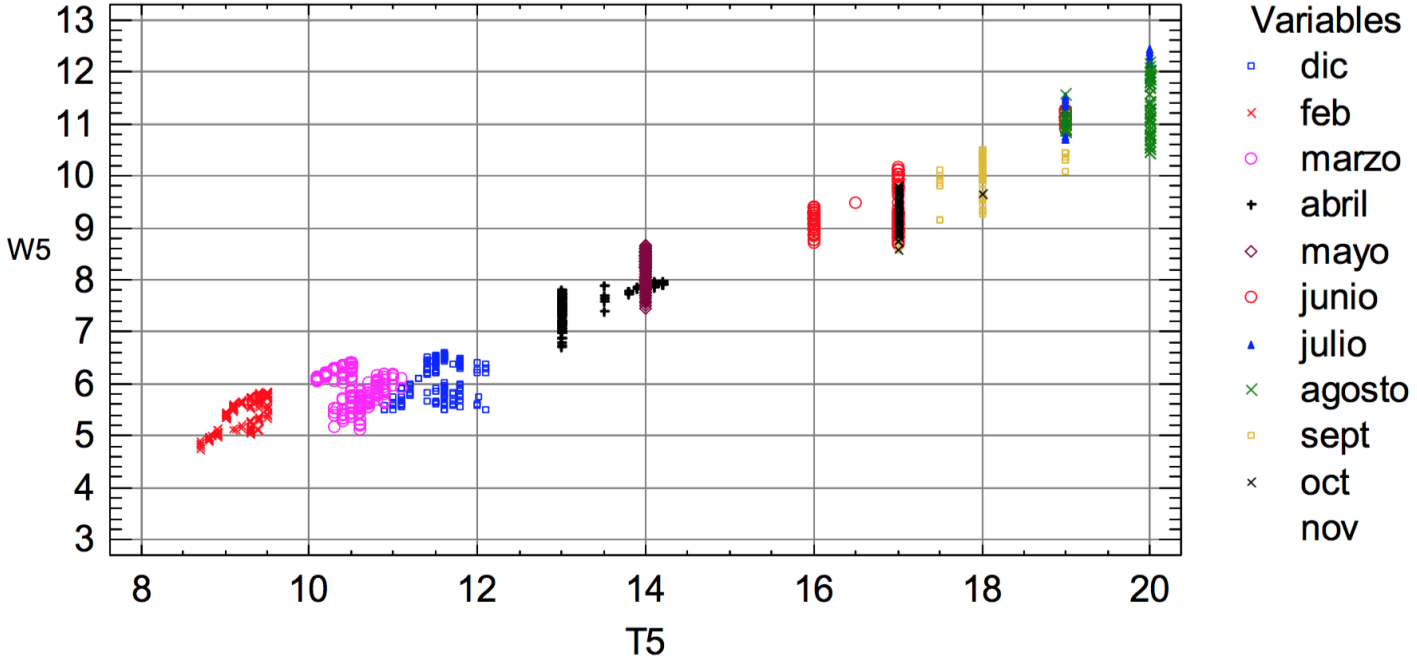


datos del aparato que mide en el exterior (el nº 2), el resultado es la gráfica de la figura 15.

Se ve también que (Fig. 15), en general, el ambiente exterior medido por el data-logger es bastante húmedo, pues aunque aumenten las temperaturas, la humedad relativa no baja por debajo de 50%, y solo en momentos aislados. Lo normal es que se estén detectando humedades habituales superiores al 70%. Esto se puede representar bien si analizamos algunos psicrométricos.

Los psicrométricos de dos días de diciembre de 2014 (Fig. 16 y 17) sirven para representar el comportamiento tipo de la Capilla en este mes frio. El día 26 es un día húmedo en el exterior, en el que los grados de humedad son similares o más altos que en el interior. Si en ese día se

Figura 14. Psicrométrico del sensor de la zona 810

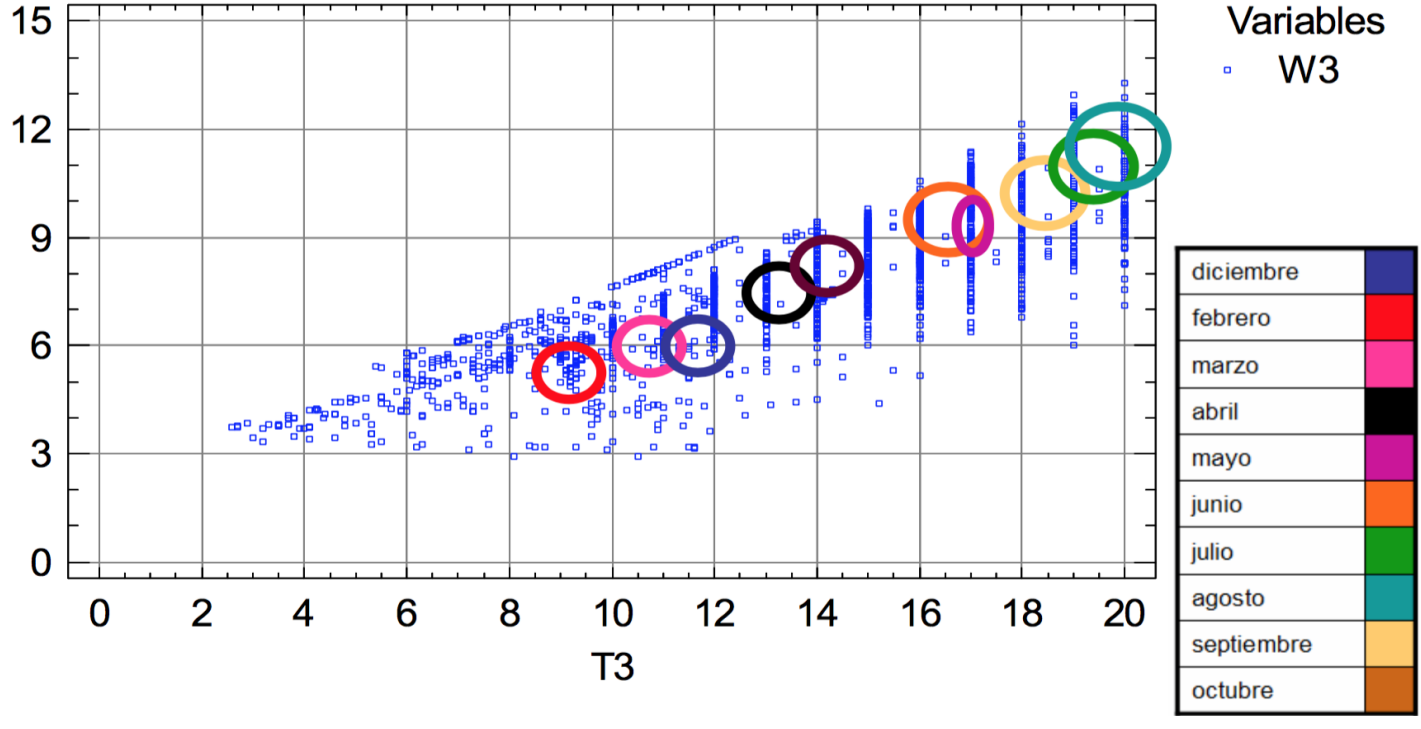


ventilara la capilla, el resultado no haría más que enfriar y aumentar la humedad de la misma (la capilla evolucionaría hasta algún punto de los situados en el arco entre las dos flechas que hemos dibujado sobre el ábaco). Si embargo, el día 29 es más seco en el exterior, y ese día la ventilación sí haría disminuir el grado de humedad de la Capilla, hacia algún punto del arco entre las dos flechas. En ambos gráficos, el rincón que monitorizamos está representado por los puntos en azul celeste, y el exterior, en amarillo.

Si lo comparamos con el caso extremo, en agosto, se puede ver la evolución de las situaciones tanto exterior como interior. Se presentan los ábacos de los días 20 y 27, en las figuras 18 y 20.

Se ve que también en este mes hay días más húmedos o más secos.

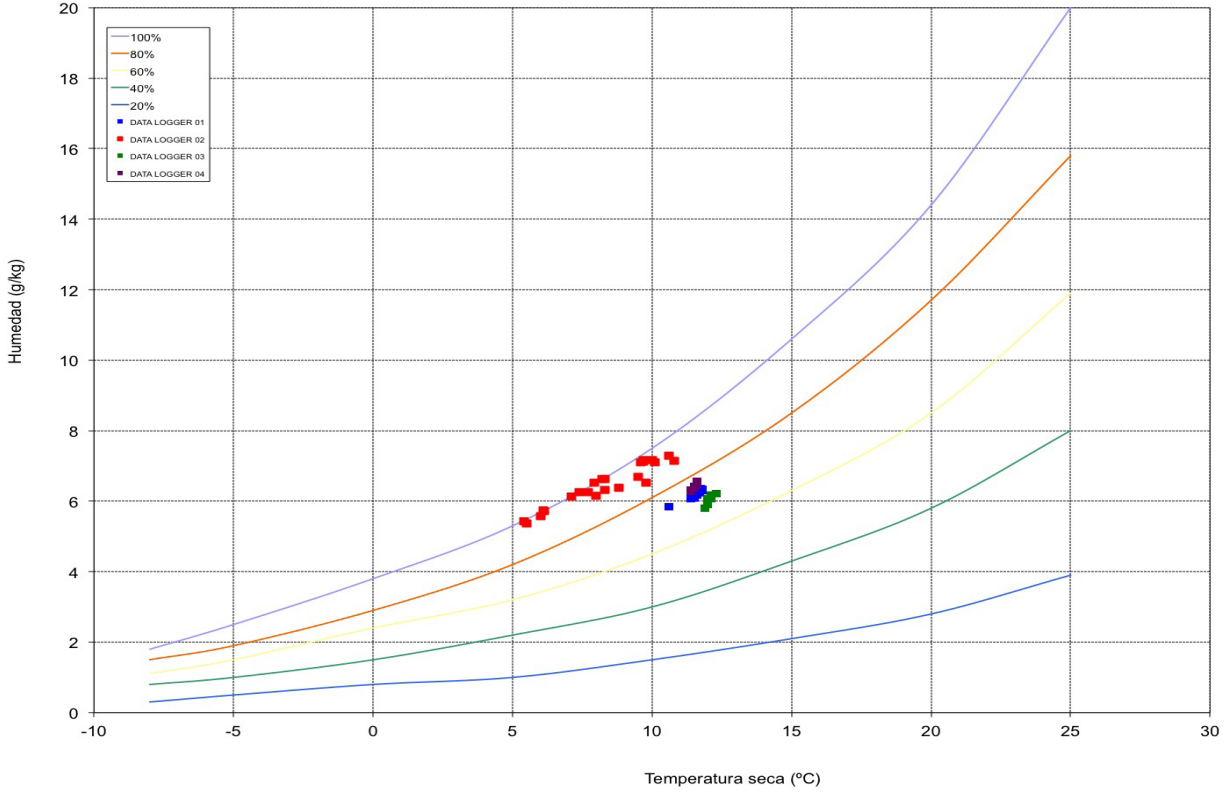
Figura 15. Psicrométrico del sensor de la zona 810, superpuesto sobre los datos de clima exterior



La ventilación en estos últimos sería claramente beneficiosa, aunque se ve que, como la humedad exterior no es demasiado baja, la eficacia de la ventilación se reduce: lo único que se conseguiría, en el mejor de los casos, es hacer bajar la humedad relativa, que ordinariamente está por encima del 80% en el nivel del enlosado, hasta valores en torno al 65-70%. Ese efecto parece que ya se da, pues si observando los puntos de color verde de la gráfica, que representan la situación higrotérmica en un punto a 50 cm por encima del rincón (data-logger nº 3), ya se ve que en él la humedad y temperatura están en equilibrio con el aire exterior: es decir, en agosto la ventilación es suficiente, lo que ocurre es que, para secar más el pavimento, se necesitaría un aire exterior un poco más seco.

¿En qué momentos se empieza a ver diferencia entre los puntos del

Figura 16. Ábaco psicrométrico de día 26 de diciembre de 2014



sensor 3 y sensor 4, lo que nos daría indicio de que la Capilla ya está todo lo seca que puede estar?. Se nota, ya desde la primavera, que cuando hay algunos días más secos, empieza a haber una pequeña diferencia, alrededor de 1 g/kg, entre el aparato 3 y el rincón 4 . En ambos casos se aprecia ya una pequeña diferencia, pero no permanente, pues el día 9 de junio de 2015(Fig. 19), vuelven a ser iguales. No se empiezan a ver diferencias estables más que a partir de mediados de junio (Fig. 21).

En definitiva, parece que la Capilla podría empezar a secar con cierta eficacia a partir de mediados de junio. Todavía en septiembre se nota que la diferencia entre 3 y 4 permanece, aunque ya hay de nuevo días más húmedos. La diferencia persiste hasta mediados de octubre, pero no se sabe si es debido a que 2015 ha sido un año cálido en otoño. Todavía a principios de noviembre se notaba algo de diferencia.

Figura 17. Ábaco psicrométrico de día 29 de diciembre de 2014

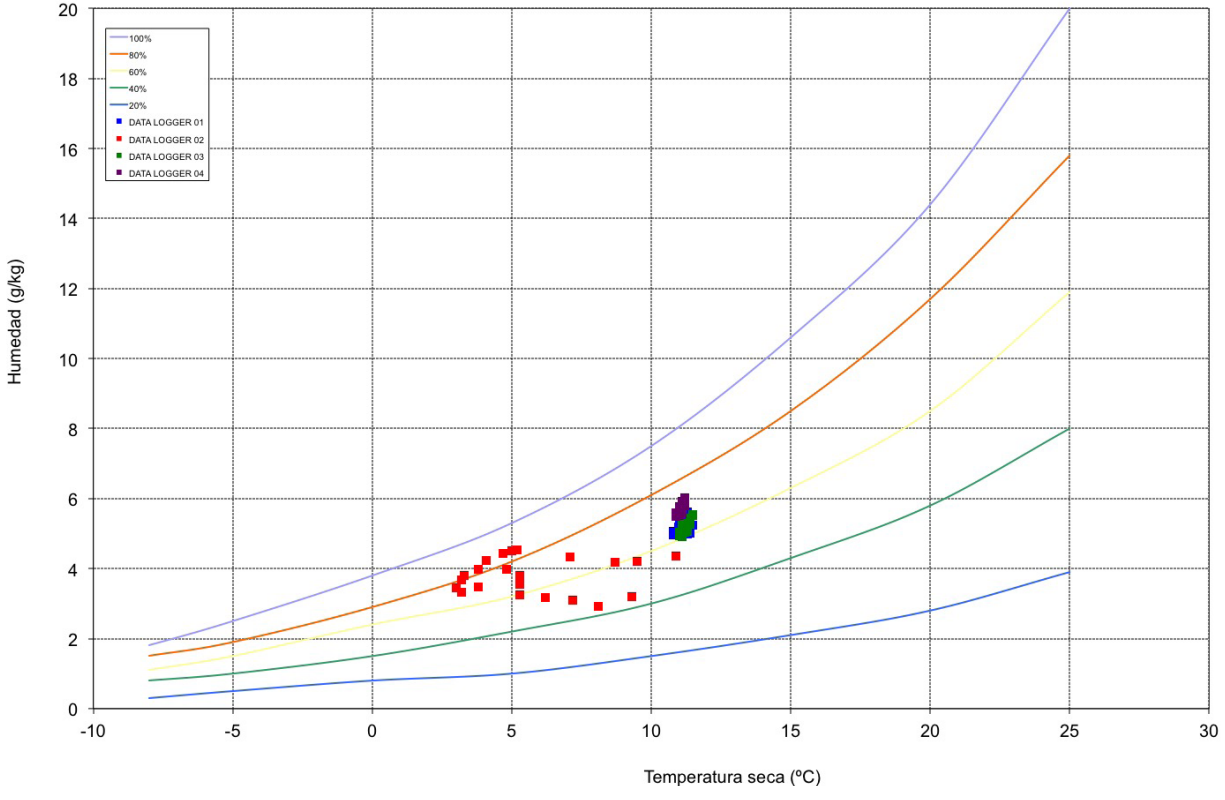


Figura 18. Ábaco psicrométrico de día 20 de agosto de 2015

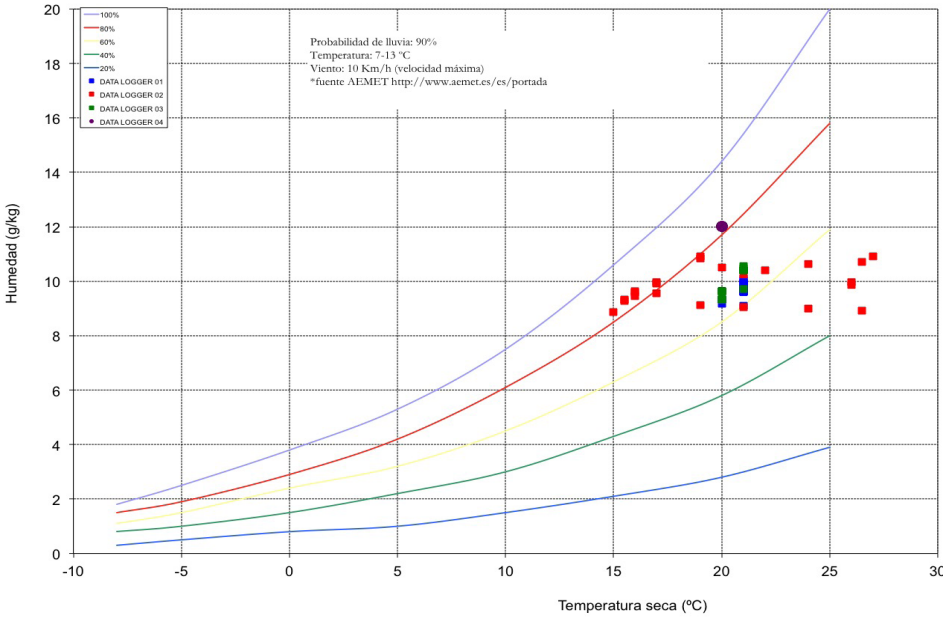


Figura 19. Ábaco psicrométrico de día 09 de junio de 2015

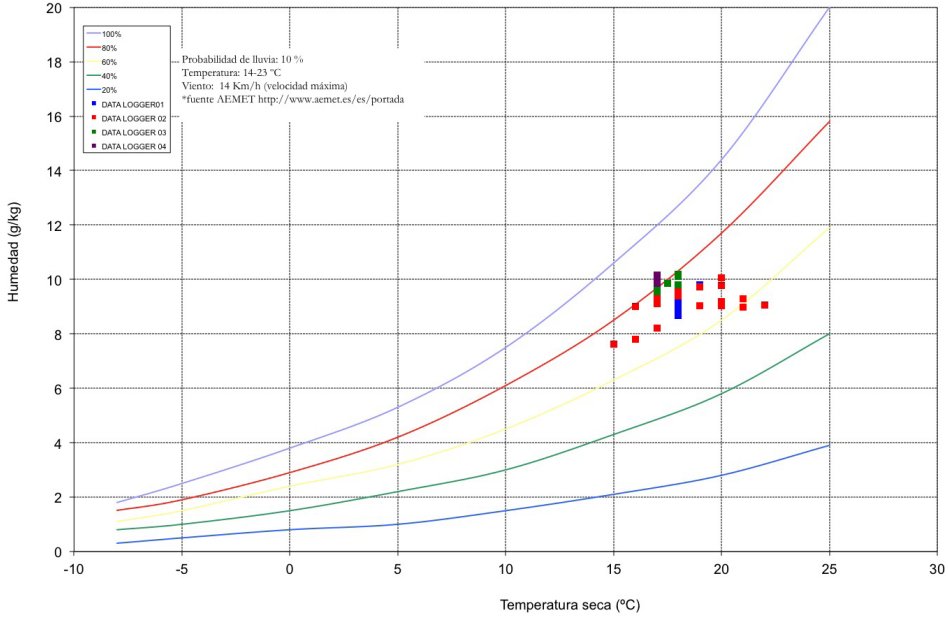


Figura 20. Ábaco psicrométrico de día 27 de agosto de 2015

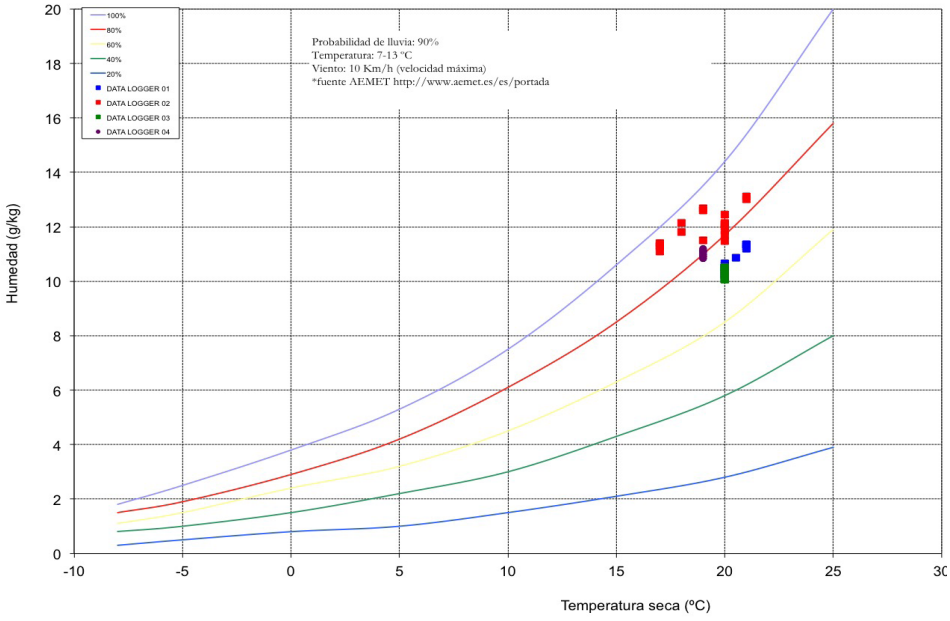
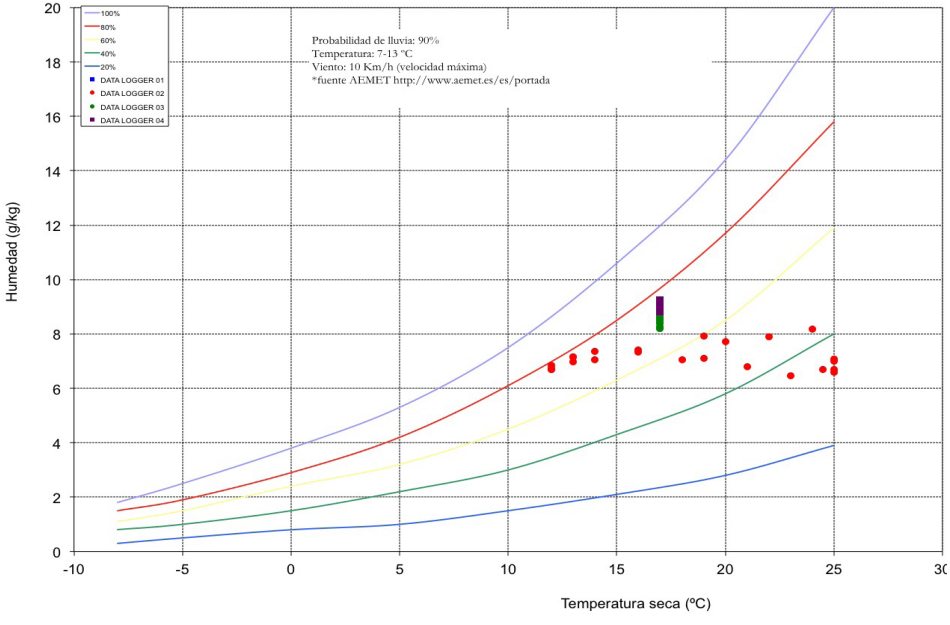


Figura 21. Ábaco psicrométrico de día 17 de junio de 2015



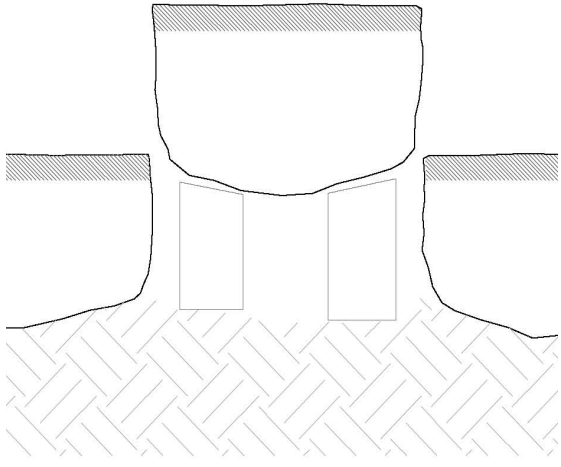
H-ENSAYO DE SEGUIMIENTO DEL SECADO DE LAS LOSAS.

Siguiendo con el plan de trabajo se procedió el día 1 de marzo de 2015 a hacer un ensayo en el enlosado. El objetivo es hacer un seguimiento de la evolución de la humedad de las losas a lo largo del año, comparando tres situaciones:

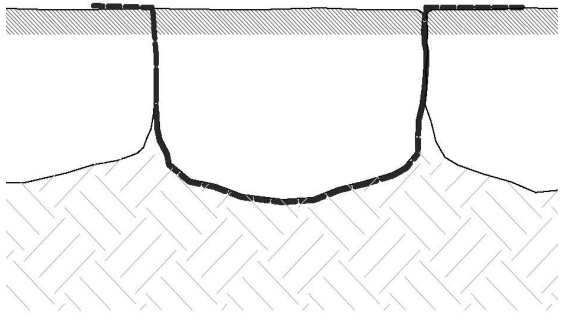
a. Losas en su estado original: en contacto con el terreno.

b. Una losa que se ha levantado, y se ha vuelto a colocar envuelta en plástico por su cara inferior, en contacto con el terreno, formando así una lámina que la impermeabiliza de la humedad que proviene de él.

c. Una losa que se ha levantado, y se ha vuelto a colocar en su sitio, pero levantada unos centímetros, de modo que puede evaporar por todos sus lados.



El fundamento del ensayo consiste en establecer la hipótesis de que la humedad que poseen las losas puede provenir de tres causas (no exclusivas entre sí):



1. La humedad del terreno, que es succionada por las losas. Si esta es la causa principal, las dos losas deberían secarse más o menos rápidamente, al haberse interrumpido el flujo de humedad desde el terreno.

2. La higroscopicidad de las losas, que hace que las losas

Figura 22. Día 17 de marzo-comienzo del ensayo

Figura 23. Día 17 de marzo-comienzo del ensayo

Figura 24. Día 31 de marzo

retengan la humedad que procede del terreno y no la evaporen. En este caso, las dos losas deberían secar, aunque mucho más despacio.

3. La higroscopicidad de las losas, incluso aunque no haya humedad del terreno, si la humedad relativa ambiente es alta y se produce condensación higroscópica en ellas. Si esta es la causa principal, ninguna de las dos losas debería secar, pues, aunque no tengan la aportación de humedad del terreno, la humedad ambiente bastaría para que su superficie se mantuviera húmeda y oscura, mientras la humedad relativa no descendiera de forma estable.

Al levantar las losas (Figura 22 y 23) se vio que la parte más oscurecida y húmeda es la superficie exterior, mientras que la parte no visible es de color más claro.

Se realiza el seguimiento visual de las losas, mediante visitas. El día 31 de marzo (Figura 23) se hizo una primera inspección, y se observó que la losa "c" se estaba secando un poco, mientras que la "b" mantenía su mancha de humedad muy parecida a original.

La segunda visita se hizo el 5 de mayo (Figura 25) , y se pudo observar que la losa "b" se mantenía húmeda, mientras que la "c" estaba ya bastante seca.

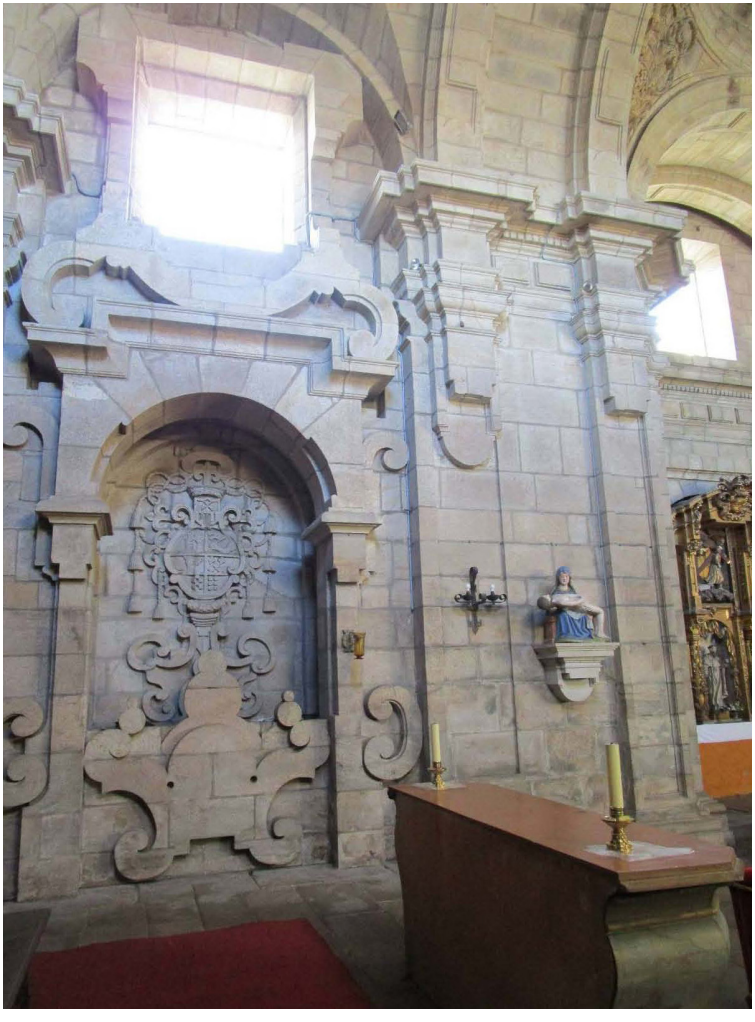
Figura 25. Día 5 de mayo

Se deduce lo siguiente:

- La losa "b" no se ha secado casi nada en los 19 días pasados desde el inicio del ensayo. El oscurecimiento es bastante similar al de las losas que la rodean, que están en contacto con el terreno húmedo. Como esta losa ya no puede absorber humedad del terreno, por estar "*impermeabilizada*" por debajo, se deduce que **la causa del oscurecimiento húmedo de las losas no es únicamente la capilaridad desde el terreno. Hay algo que produce una dificultad en que esta losa evapore.**

- La losa "c" ya se había empezado a secar a finales de marzo, y estaba bastante seca el 5 de mayo. Esta losa no sólo no absorbe humedad desde el terreno (por no estar en contacto con él), sino que tiene más superficie de evaporación que la primera, pues está aireada por todas sus caras. Parece que, por esta razón, tiene más facilidad para secar que la losa "b". También parece indicar, al estar secando, que l**a causa del oscurecimiento húmedo no es únicamente la humedad ambiente actuando sobre la higroscopicidad de las losas.**

- Lo más relevante es, sin embargo, esa diferencia en el comportamiento de las dos losas, que indica que **la causa del oscurecimiento es una combinación de ambos factores: algo de humedad del terreno, que se retiene en las losas debido a la higroscopicidad de las mismas, y que sólo puede secar cuando las condiciones de evaporación son muy favorables, como ocurre con la losa "c".** La explicación más coherente con los resultados del ensayo es que **las losas son muy higroscópicas y retienen la humedad,** no permitiendo una evaporación eficaz del enlosado por la cara superior. Sin embargo, cuando se deja que la piedra evapore por todas sus caras, sí se produce el secado.



I-ENSAYO DE HIGROSCOPICIDAD DE LAS LOSAS.

Para hacer este ensayo se han aprovechado dos trocitos de piedra que se desprendieron al levantar las losas en el ensayo anterior. Sobre estas dos muestras se han hecho los siguientes ensayos:

1. Determinación del contenido en humedad (Ho), por método gravimétrico (pesadas antes y después de secar las muestras)

2. Curva de comportamiento higroscópico en cámara húmeda, al 75% y al 98% de humedad relativa ambiente. Se van pesando las muestras semanalmente, calculando el porcentaje de peso de agua que capturan "del ambiente", hasta que el peso se estabiliza.

3. Coeficiente de absorción de las losas (Ca), mediante inmersión a saturación.

Se han hecho además estos ensayos en algunas muestras de tierra bajo las losas, y de ceniza, que apareció junto a la tierra, marcando que había caído al terreno por las juntas.

Los resultados aparecen en la tabla y en el gráfico siguientes:

Muestra CO05

Muestra CO04

Método gravimétrico aplicado a la muestra CO04

	muestra	PS	**H0**	**H eq 75**	**H eq 98**	**Ca**
CO01	tierra bajo la tumba 14	83,07	**17,78**	2,44	5,16	--
CO02	Ceniza bajo tumba 14	137,65	**1,88**	0,3	5,98	--
CO03	losa 02 trozos de la parte inferior	19,2	**1,15**	0,36	0,47	--
CO04	losa 02 esquina inferior	45,4	**2,16**	0,33	0,31	2,87
CO05	losa 02 esquina superior	66,89	**1,75**	0,88	3,84	2,72

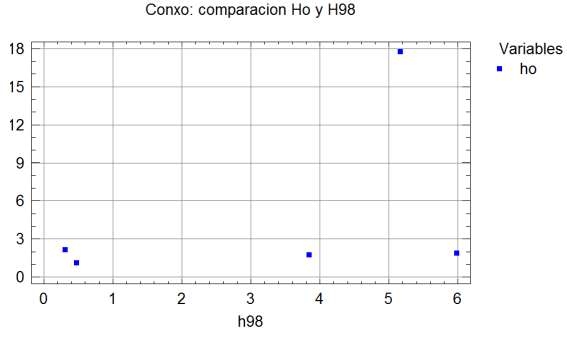
El valor de "H0" corresponde a la "humedad original" de las muestras, es decir, a la humedad que tenían cuando se extrajeron del edificio. Se expresa en porcentaje sobre peso seco.

El valor "H98" refleja la higroscopicidad máxima de la muestra, que es la cantidad de humedad que capta del ambiente, cuando la humedad relativa del aire que lo rodea está en valores de 98%. Cuando los materiales son poco higroscópicos, este valor es bajo.

La comparación de ambos valores (como se muestra en el gráfico que acompaña a estas líneas) sirve para establecer si la humedad de un material procede de una aportación líquida, o si se puede deber tan sólo al ambiente. Cuando Ho es mayor que H98, eso significa que la humedad que tenían los materiales cuando se hizo el muestreo no provenía sólo del ambiente (no se debía sólo a la higroscopicidad del material), sino también a alguna aportación de agua líquida del terreno.

El valor Ca de las muestras de piedra expresa el Coeficiente de absorción, que es la máxima cantidad de agua que la piedra llegaría a absorber si estuviera sumergida en agua.

Comparación del contenido en humedad original y de la higroscopicidad de las muestras



Comentario a los resultados

Los resultados son muy interesantes y aunque el número de muestras no es muy elevado (por la inconveniencia de hacer un muestreo más destructivo), se observa:

- La muestra más húmeda (Ho) es la del terreno bajo la losa, que tiene 17,78 % de humedad. La higroscopicidad de esta muestra es del 5,16%, que no es un valor bajo, aunque como Ho > H98, se puede decir que **el terreno tiene una humedad que proviene de alguna fuente diferente del ambiente.**

- El contenido en humedad de los trozos de losa de granito oscila entre 1,15% y 2,16%. Pero el valor 2,16%, de la parte inferior de la losa, está cercano a la saturación (el coeficiente de absorción Ca = 2,87%) Esto viene a confirmar que **la losa está bastante saturada en la parte que toca con el terreno.**

- **La higroscopicidad de las muestras de piedra es diferente en la cara superior y en la inferior de la losa.** La muestra de arriba tiene un H98 = 3,84%, que es un valor más alto que su Ho, e incluso que su Ca. Esto significa que, para humedecer esta parte de la piedra, basta con que el ambiente sea muy húmedo, aunque no haya agua en el terreno, y que **la parte superior de la piedra puede llegar a saturarse tan sólo con la humedad que absorbe del aire húmedo.**

- Las muestras de la parte inferior de la losa no son tan higroscópicas como las de la parte superior. Su H98 varía de 0,31 % a 0,47%, y son valores inferiores a los correspondientes de Ho. Luego **la base inferior de las losas debe su pequeña humedad al contacto con el terreno húmedo**, no a la higroscopicidad.

Las **conclusiones** de estos ensayos revelaban lo siguiente:

- **El terreno tiene una humedad que proviene de alguna fuente diferente del ambiente**. Hay humedad en el terreno bajo las losas levantadas. El terreno es algo higroscópico y retiene la humedad.

- **La losa está bastante saturada en la parte que toca con el terreno.**

- Las losas reciben cierta humedad por el contacto con el terreno mojado. Succionan esta humedad, y se difunde a través del espesor de la losa. Cuando la humedad alcanza a la superficie, a ésta le "cuesta" evaporar porque la parte superior de las losas es higroscópica, y tiende a retener el agua. Por eso la losa "b" tarda tanto en secar, a pesar de que ya no tiene contacto con el terreno húmedo.

- **La higroscopicidad de las muestras de piedra es mayor en la cara superior que en la inferior de la losa.**

- La cara superior de las losas es tan higroscópica que **puede llegar a saturarse tan sólo con la humedad que absorbe del aire húmedo del ambiente**, incluso si no hubiera humedad en el terrreno. Por la higroscopicidad de la cara superior de las losas, si la humedad relativa ambiental interior de la Capilla se mantiene de forma habitual por encima del 80%, es normal que las piedras "adsorban" (se habla de "adsorción" de vapor de agua en los materiales) la humedad ambiental y la condensen, oscureciéndose. Es decir, en la apariencia oscura del enlosado no sólo interviene la humedad del terreno, sino la humedad del ambiente, que puede condensarse en la superficie y aumentar el contenido en humedad de la piedra.

- Las muestras de la parte inferior de la losa no son tan higroscópicas como las de la parte superior. Luego **la base inferior de las losas debe su pequeña humedad al contacto con el terreno húmedo**, no a la higroscopicidad. Por eso las losas expuestas al aire secan mejor

por debajo que por arriba.

- Además, es habitual que las sales higroscópicas disueltas, en una cámara cerrada, mantienen la humedad ambiental en un valor fijo, que depende del tipo de sal (depende de lo que se conoce como "humedad de equilbrio de la sal"). **Esto podría explicar la constancia en la humedad relativa sobre la superficie del enlosado, en todos los meses del año, alrededor del 80% o más.**

En resumen, aunque el terreno está húmedo bajo las losas, esta humedad se retiene anormalmente, tanto en el terreno como en la piedra, debido a la presencia de sales higroscópicas (nitratos y cloruros). La contaminación es más alta en la superficie de las losas que en su parte inferior y hace un doble efecto: por una parte retiene la humedad que proviene del terreno y por otra, atrae y condensa el vapor de agua del aire ambiente de la Capilla. Estos dos mecanismos impiden el secado del pavimento, que ya de por sí es difícil porque no hay condiciones favorables del aire exterior.

Se resumen a continuación las principales conclusiones del estudio.

- La Capilla presenta lesiones de humedad en los muros y el pavimento, que podrían ser, en su mayor parte, debidas a antiguas filtraciones desde el terreno del cementerio y el cuerpo de nichos. El agua debía atravesar la cimentación y recorrer el terreno bajo el enlosado, siguiendo probablemente líneas de máxima pendiente, o tal vez algún sistema de atarjea. A pesar de las manchas oscuras, justamente la zona de tumbas no es donde se miden mayores evaporaciones.

- Las áreas donde se ha podido medir mayor evaporación en el pavimento parecen corresponder a dos zonas:

- Una de ellas corresponde al rincón en la zona 810, que es donde se ha detectado mayor humedad.

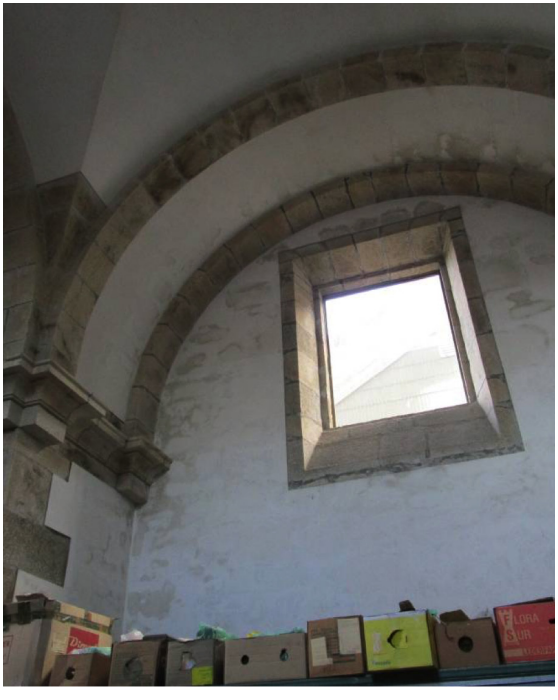
- La otra tiene forma como de una franja que recorre el crucero y el sotocoro, en diagonal (Fig.09). No muestra una humedad uniforme, pero los puntos más intensos se localizan en esta franja. La forma parece sugerir como si hubiera un línea preferente de recorrido de la humedad, lo cual es coherente con la hipótesis de que el terreno del cementerio drena siguiendo esta línea bajo el pavimento de la capilla.

- Es posible que el agua filtrada no siga caminos demasiado profundos, sino que discurra en la proximidad del asiento de las losas sobre

el terreno. Esto podría explicar la procedencia de la humedad y el crecimiento biológico que aparece en el zócalo del costado Sur de la Capilla, que está sobreelevado respecto al terreno. Si esta hipótesis es acertada, podría explicar por qué se mide más humedad en el muro Sur de la Capilla que en el Norte. El agua filtrada bajo las losas quedaría parcialmente retenida por la zapata de la cimentación.

- No se ha encontrado una explicación clara sobre la causa de la humedad en la zona 810, en el rincón SE del crucero de la Capilla, para que éste sea el punto más húmedo, puesto que está alejado del cementerio, y sobreelevado sobre el terreno. Tampoco se entiende por qué el foco asciende a tanta altura en ese rincón. En algunas inspecciones se ha llegado a medir evaporación hasta 1,5 metros de altura, y esto no es habitual en muros de sillería de granito. Este punto antiguamente mostraba dos grietas señaladas en el plano de lesiones anterior a la intervención de restauración. No sabemos si la reparación de la misma puede tener relación con la forma de manifestarse la lesión actual

Figura 26. Agua de lluvia que ha pasado al interior del camarín.



- Los valores de humedad medidos en el perímetro del camarín son más bajos que en la capilla, aunque son visibles en los muros las señales de que la hoja que forma el muro tiene cierta permeabilidad al agua (Fig.26) de lluvia. Esto refuerza la idea de que la humedad de la línea suelo-pared no proviene de la lluvia inmediata, pues si fuera así las zonas más afectadas serían las de muros de menor espesor (el camarín).

- La humedad debía, tradicionalmente, evaporar a través de muros y del pavimento, aunque las condiciones ambientales no son las más adecuadas para el secado del edificio, pues el microclima analizado durante todo el año de estudio, sólo favorece una evaporación eficaz entre los meses de junio a septiembre, y además muy lentamente porque la diferencia de grado de humedad respecto al aire exterior es pequeña (el aire exterior es muy húmedo). Aún así, parece que sería suficiente la evaporación para un terreno no demasiado húmedo, pero

no para el caso de las filtraciones desde el cementerio.

- Para que pudiera secarse la capilla, necesitaría un tiempo relativamente constante de grado de humedad bajo en el exterior. Estas condiciones, durante los meses estudiados, se han dado sólo en el mes de junio. Es durante este mes cuando el edificio puede "respirar", evaporando la humedad que pudiera tener retenida en sus elementos constructivos. Posiblemente ya en mayo hay condiciones para que, en algunas horas del día, haya evaporación, pero son sólo algunas horas, y por eso no se pueden considerar como "condiciones estables".

- Aunque el edificio estuviera más ventilado, no se resolvería el problema de la falta de evaporación, pues la toma de aire exterior puede ser, en bastantes momentos del año, perjudicial (el aire muchas veces está más húmedo en el exterior que el del interior de la Capilla). Por lo tanto, parece el edificio en invierno, aunque húmedo en muchos puntos, no puede evaporar porque las condiciones exteriores no lo facilitan y porque tampoco hay ventilación para los momentos en los que ésta sería beneficiosa. Además, los momentos favorables a la ventilación no son tantos, pues gran parte del tiempo no es conveniente ventilar, por las condiciones del aire exterior.

- La tierra bajo las losas está parcialmente contaminada de sales higroscópicas, principalmente con nitratos y eso origina que se dificulte la evaporación, pues los materiales tienden a retener el agua.

- La cara superior de las losas está contaminada también por sales higroscópicas, en mucha mayor proporción que la tierra o que las partes inferiores de las mismas losas. Se han encontrado sobre todo nitratos y en menor cantidad, cloruros. Estas sales producen dos efectos:

a. Por un lado, dificultan mucho la evaporación superficial de la losa, pues tienden a retener el agua. Generan sobre el pavimento una capa de aire con una humedad relativa muy alta, 80% o incluso superior y esto ocurre así en cualquier época del año, aunque el

resto de los paramentos estén mucho más secos. Hemos constatado este hecho tanto en la monitorización durante todo el año, como en las auscultaciones higrotérmicas periódicas. La humedad sobre la superficie del pavimento está siempre en valores superiores al 80%, y bastante uniformemente distribuida. Puede tratarse del efecto de inducción de una humedad de equilibrio propia de las sales presentes en la piedra, que genera un microclima en una fina lámina de aire superficial.

b. Además de ese efecto, las losas contaminadas tienden a condensar el vapor de agua del aire de la capilla provocando que, aunque no hubiera humedad bajo el enlosado, la superficie aparezca húmeda.

- Por su contaminación, las losas tienen dificultad para secar. En el ensayo de levantado de las dos losas, que se refirió en el informe de julio de 2015, evaporaba mejor la losa que tenía las caras inferiores al aire. La que permaneció en su lugar, aunque estaba impermeabilizada por abajo y por lo tanto no tenía contacto con el terreno húmedo, tardó mucho en secar.

- Los nitratos que se acumulan en la superficie de las losas pueden tener origen antiguo, cuando el enlosado estaba revestido por un entarimado enrastrelado, y por debajo se extendía una capa de cenizas, sobre el enlosado. El amoníaco transportado por el agua infiltrada al terreno desde el cementerio, al evaporar en la zona del enlosado, podría haber sido captado en gran medida por las cenizas, por su alcalinidad, y se producían nitritos. Estos podrían haber sido luego transformados a nitratos por bacterias Nitrobacter, aún presentes en algunas de las muestras analizadas. El proceso parece venir de hace tiempo, posiblemente de antes de la intervención que canalizó las pluviales, pues en la actualidad no hay una gran actividad de estas bacterias.

- Hay también contaminación de los muros, como se ha podido ver en la misma investigación, al hacer algunas muestras. Pero en ellos sólo

quedan bacterias desnitrificantes, que son las últimas en aparecer, y no hay bacterias que sugieran que hoy en día hay aportaciones de amoníaco activas.

- La monitorización, combinada con las otras técnicas diagnósticas utilizadas en este estudio, se muestra como una ayuda interesante. Para que esto sea útil, es importante establecer primero un diseño experimental que permita interpretar los datos, no sólo registrarlos y establecer algoritmos, sino que la instalación de los aparatos responda a una serie de preguntas previas del investigador. Además es necesario que los aparatos sean robustos, bien calibrados, y resistan humedades altas, que pueden llegar al 100% humedad relativa.

K. GLOSARIO DE TÉRMINOS

Capilaridad: Propiedad de los líquidos que depende de su tensión superficial (la cual, a su vez, depende de la cohesión o fuerza intermolecular del líquido), que le confiere la capacidad de subir o bajar por un tubo capilar. En el caso de un líquido puesto en contacto con un sólido sube o baja en las proximidades de este.

Comportamiento higrotérmico: La respuesta de un elemento ante las condiciones de temperatura y humedad a las que se encuentra expuesto.

Data-logger: Un registrador de datos es un dispositivo electrónico que registra datos en el tiempo o en relación a la ubicación por medio de instrumentos y sensorespropios o conectados externamente.

Gradiente térmico: Aumento o disminución gradual de la temperatura a lo largo de un espacio, geográfico o del tiempo.

Higroscopicidad: es la capacidad de los materiales para absorber la humedad atmosférica. Para cada sustancia existe una humedad que se llama de equilibrio, es decir, un contenido de humedad tal de la atmósfera a la cual el material ni capta ni libera humedad al ambiente. Si la humedad ambiente es menor que este valor de equilibrio, el material se secará, si la humedad ambiente es mayor, se humedecerá.

Humedad de equilibrio: Cuando un sólido húmedo se pone en contacto, con aire de temperatura y humedad determinadas y constantes, se alcanzaran las condiciones de equilibrio entre el aire y el sólido húmedo. Se logran las condiciones de equilibrio cuando la presión parcial del agua que acompaña al sólido húmedo es igual a la presión de vapor del agua en el aire.

Inercia térmica: es la propiedad que indica la cantidad de calor que puede conservar un cuerpo y la velocidad con que lo cede o absorbe. Depende de la masa térmica, del calor específico de sus materiales y del coeficiente de conductividad térmica de éstos.

Método gravimétrico: Método cuantitativo que consiste en la obtención del peso de la muestra sometida a distintas condiciones de humedad para caracterizar su comportamiento hídrico del material.

Monitorización: Control de la evolución en el tiempo de un o varios parámetros de los que interese hacer un seguimiento.

Cámara húmeda: ensayo de laboratorio consistente en la creación de un espacio estanco con unas condiciones de humedad y temperatura constantes y controladas.

- *Lixiviado*: líquido resultante del proceso de percolación de un fluido al atravesar un sólido.

Anotaciones:

otros títulos de la colección

CONSORCIO DE SANTIAGO
Rúa do Vilar, 59
15705
Santiago de Compostela
www.consorciodesantigo.org

CONSORCIO DE SANTIAGO