



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



# LOS ESTUCOS MAYAS

Estudio físico-mecánico de variantes técnicas y su  
aplicación en la conservación y restauración en el sitio  
arqueológico La Blanca, Petén, Guatemala.

Tesis doctoral

Francisca Lorenzo Mora

Directora: Begoña Carrascosa Moliner

Julio 2019





UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

# LOS ESTUCOS MAYAS

Estudio físico-mecánico de variantes técnicas y su aplicación en la conservación y restauración en el sitio arqueológico La Blanca, Petén, Guatemala.

Tesis doctoral  
Francisca Lorenzo Mora

Directora: Begoña Carrascosa Moliner

Valencia, Julio de 2019







A mi padre,  
*in memoriam*

# ÍNDICE

Resumen/Abstract/Resum .....	12
Agradecimientos .....	18
BLOQUE 1 · MARCO TEÓRICO .....	21
Capítulo 1 · Introducción .....	23
1.1 Presentación, motivación e hipótesis de la investigación .....	24
1.2 Antecedentes y estado de la cuestión .....	26
1.2.1 Corriente tecnológica .....	27
1.2.2 Corriente tradicional .....	28
1.3 Objetivos .....	31
1.3.1 Objetivo general .....	31
1.3.2 Objetivos específicos .....	31
1.4 Metodología .....	32
1.4 Organización del documento .....	36
Capítulo 2 · El patrimonio arqueológico maya .....	39
2.1 Conservación en la cultura maya .....	40
2.2 El patrimonio maya bajo la dominación española .....	41
2.3 Siglo XIX .....	43
2.4 Siglo XX .....	46
2.5 Guatemala. Antecedentes y estado legislativo actual .....	48

Capítulo 3 · Los estucos mayas .....	53
3.1 Breve introducción a la arquitectura maya .....	54
3.2 El papel del estuco en las construcciones mayas .....	57
3.2.1 El revoco de cal en las construcciones populares .....	57
3.2.2 El estuco en la arquitectura monumental .....	58
3.3 Los materiales constitutivos .....	60
3.3.1 La cal .....	60
3.3.1.1 Tipos de cales .....	61
3.3.1.2 La materia prima .....	62
3.3.2 Áridos .....	63
3.3.2.1 Características físicas de los áridos .....	63
3.3.2.2 Características químicas de los áridos .....	64
3.3.2.3 El empleo de <i>Sascab</i> como árido en los estucos del área maya .....	64
3.3.3 Aditivos .....	65
3.3.3.1 Orgánicos .....	66
3.3.3.2 Inorgánicos .....	67
3.4 Proceso de elaboración .....	69
3.4.1 Procesamiento del conglomerante .....	69
3.4.1.1 Extracción de la piedra caliza .....	69
3.4.1.2 Calcinación .....	70
3.4.1.3 Apagado .....	73
3.4.2 La adición del árido .....	79
3.4.2.1 Añadido a la cal apagada .....	79
3.4.2.2 Añadido a la cal viva .....	79
3.4.3 Aditivos .....	80
3.4.3.1 Adición en el agua de apagado .....	80
3.4.3.2 Adición del macerado en la mezcla del mortero .....	80
3.4.4 Carbonatación .....	81
3.5 Aplicación de los estucos .....	82
3.6 Técnicas artísticas asociadas al estuco .....	84
3.6.1 Pintura mural .....	84
3.6.2 Grafitos .....	87

Capítulo 4 · Aproximación al lugar de estudio .....	91
4.1 El sitio arqueológico La Blanca .....	92
4.1.1 Contexto histórico y temporal .....	92
4.1.2 Contexto geográfico .....	94
4.1.2.1 Clima .....	95
4.1.2.2 Vegetación .....	96
4.1.3 Contexto cultural .....	97
4.1.3.1 Descripción de la zona arqueológica estudiada .....	97
4.1.3.2 La Acrópolis. Arquitectura y funcionalidad de los edificios .....	99
4.2 Los estucos de la Acrópolis de La Blanca .....	104
4.2.1 Caracterización organoléptica <i>in situ</i> .....	104
4.2.1.1 Localización y extensión .....	104
4.2.1.2 Color .....	109
4.2.1.3 Textura y estructura .....	110
4.2.2 Caracterización físico-química .....	111
4.2.2.1 Propiedades hídricas .....	111
4.2.2.2 Caracterización química .....	112
4.2.3 Evidencias artísticas .....	113
4.2.3.1 Grafitos incisos .....	114
4.2.3.2 Pintura mural .....	117
4.2.4 Estado de conservación de los estucos .....	118
4.2.4.1 Liberación de las estancias. Secuencia cronológica .....	118
4.2.4.2 Principales patologías presentes en los revestimientos .....	120
4.2.4.3 Seguimiento periódico del estado de conservación .....	127
4.2.5 Causas de alteración .....	132
4.2.5.1 Causas físicas .....	132
4.2.5.2 Causas químicas .....	138
4.2.5.3 Causas biológicas .....	140
4.2.5.4 Causas antrópicas .....	142
4.2.6 Intervenciones realizadas sobre los estucos de La Blanca .....	143
4.3.6.1 Cubiertas de protección .....	143
4.3.6.2 Documentación y registro .....	144
4.3.6.3 Intervenciones sobre los revestimientos .....	144
4.3.6.4 Medidas preventivas .....	150

BLOQUE 2 · FASE EXPERIMENTAL .....	153
Capítulo 5 · Estudio experimental de morteros tradicionales de cal .....	155
5.1 Materiales y metodología .....	156
5.1.1 Materias primas: selección, preparación y dosificación .....	156
5.1.1.1 Cal .....	156
5.1.1.2 Áridos .....	160
5.1.1.3 Aditivos vegetales .....	161
5.1.2 Elaboración de las probetas .....	163
5.1.2.1 Tipología de morteros y composición .....	163
5.1.2.2 Lugar de elaboración .....	165
5.1.2.3 Condiciones ambientales presentes .....	166
5.1.2.4 Moldeado y curado .....	166
5.1.2.5 Siglado .....	167
5.1.2.6 Transporte y almacenaje .....	167
5.1.2.7 Adecuación de las probetas a los respectivos ensayos .....	167
5.2 Ensayos de caracterización física .....	168
5.2.1 Determinación de la absorción de agua por capilaridad .....	168
5.2.1.1 Metodología de ensayo .....	168
5.2.1.2 Resultados del ensayo .....	169
5.2.2 Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica .....	174
5.2.2.1 Metodología de ensayo .....	174
5.2.2.2 Resultados del ensayo .....	175
5.2.2.3 Desorción de agua a presión atmosférica .....	177
5.2.3 Determinación de la permeabilidad al vapor de agua .....	178
5.2.3.1 Metodología de ensayo .....	180
5.2.3.2 Resultados del ensayo .....	180
5.2.4 Determinación de la resistencia a la carbonatación .....	188
5.2.4.1 Condiciones de ensayo .....	188
5.2.4.2 Resultados del ensayo .....	188
5.2.5 Determinación de la densidad aparente .....	192
5.2.5.1 Metodología de ensayo .....	193
5.2.5.2 Resultados del ensayo .....	193
5.2.6 Discusión y conclusiones de los resultados de los ensayos de caracterización física ..	195

5.3 Ensayos de caracterización mecánica .....	197
5.3.1 Determinación de la resistencia al desgaste por rozamiento .....	197
5.3.1.1 Metodología de ensayo .....	198
5.3.1.2 Resultados del ensayo .....	199
5.3.2 Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros endurecidos .....	206
5.3.2.1 Metodología de ensayo .....	207
5.3.2.2 Resultados del ensayo .....	208
5.3.3 Determinación de la resistencia a compresión .....	211
5.3.3.1 Metodología de ensayo .....	211
5.3.3.2 Resultados del ensayo .....	212
5.3.4 Discusión y conclusiones de los resultados de los ensayos de caracterización mecánica ..	216
5.4 Ensayos de estabilidad frente a agentes de degradación físico-química ...	217
5.4.1 Determinación de la resistencia a la cristalización de sales .....	217
5.4.1.1 Metodología de ensayo .....	217
5.4.1.2 Resultados del ensayo .....	218
5.4.2 Determinación de la resistencia al choque térmico .....	220
5.4.2.1 Metodología de ensayo .....	220
5.4.2.2 Resultados del ensayo .....	221
5.4.3 Determinación de la estabilidad frente a ciclos de envejecimiento acelerado por irradiación de luz ultravioleta .....	223
5.4.3.1 Metodología del ensayo .....	224
5.4.3.2 Resultados del estudio .....	225
5.4.4 Determinación de la estabilidad frente a ciclos de envejecimiento acelerado por exposición a humedad y temperatura .....	232
5.4.4.1 Metodología del ensayo .....	232
5.4.4.2 Resultados del ensayo. Evaluación de los cambios físico-químicos experimentados ..	233
5.4.5 Determinación de la estabilidad frente a la degradación natural .....	258
5.4.5.1 Condiciones de exposición .....	258
5.4.5.2 Evaluación de los cambios físicos por inspección visual .....	259
5.4.5.3 Evaluación de los cambios en el comportamiento hídrico mediante ensayo de penetración de agua .....	263
5.4.6 Conclusiones sobre la estabilidad de los morteros frente a agentes de degradación ..	266

5.5 Valoración de las propiedades de los morteros estudiados; discusión y selección en base a su idoneidad .....	267
5.5.1 Valoración de las propiedades físicas .....	269
5.5.2 Valoración de las propiedades mecánicas .....	271
5.5.3 Valoración de la durabilidad frente a agentes de deterioro físico-químico .....	272
5.5.4 Valoración de la durabilidad frente al envejecimiento natural .....	273
5.5.5 Selección del mortero idóneo .....	275
Capítulo 6 · Propuesta metodológica para una intervención sostenible .....	277
6.1 Criterios fundamentales de restauración .....	278
6.2 Restauración de los estucos. Acciones principales .....	280
6.2.1 Documentación y registro gráfico inicial .....	280
6.2.2 Limpieza físico-mecánica de los estucos y del soporte pétreo .....	281
6.2.3 Eliminación de antiguas reposiciones .....	283
6.2.4 Selección de las zonas a reintegrar .....	283
6.2.5 Elaboración y aplicación del mortero .....	285
6.2.5.1 Obtención de las materias primas .....	285
6.2.5.2 Apagado de la cal .....	287
6.2.5.3 Maceración de las cortezas .....	288
6.2.5.4 Dosificación del mortero .....	288
6.2.5.5 Aplicación del mortero .....	288
6.3 Conservación y mantenimiento .....	289
6.3.1 Drenaje y limpieza del sitio .....	289
6.3.2 Control y reposición de cubiertas .....	290
6.3.3 Limpieza y reposiciones periódicas .....	292
6.3.4 Vigilancia .....	293
Conclusiones finales .....	295
Bibliografía .....	305
Anexo 1 · Informe Analítico .....	319
Anexo 2 · Difractogramas obtenidos por difracción de rayos x .....	329

## Resumen

La pintura mural, los relieves escultóricos y los revestimientos arquitectónicos forman parte de las brillantes manifestaciones artísticas que nos legó la antigua cultura maya. Mediante el empleo del color, la forma y la textura, modelaron las pastas de estuco con gran prodigio, engalanando sus monumentales construcciones. Pero estas obras, que suponen un valioso testimonio de la vida de sus antiguos habitantes, a menudo se hallan en un avanzado estado de deterioro tras la excavación arqueológica, debido a las duras condiciones de abandono, de sepultura y de exposición a la intemperie en las que se hallaron durante cientos de años.

La excavación y la nueva exposición a la luz, supone un cambio brusco de las condiciones en las que se habían mantenido en equilibrio, con lo que los mecanismos de deterioro se desencadenan rápidamente. Para mitigarlo, las tareas de protección, limpieza y refuerzo resultan indispensables para garantizar su conservación.

A mediados del pasado siglo XX, se comenzaron a emplear en área maya distintos productos sintéticos, que habían funcionado con éxito en algunas intervenciones, en Europa. Una década después, los efectos negativos derivados del empleo de estas sustancias se hicieron patentes, y quedó constatada la incompatibilidad de estos materiales con las condiciones ambientales que rodean a los sitios arqueológicos del área maya. De estas experiencias y del interés por recuperar las técnicas tradicionales y los materiales afines, se comenzaron a estudiar y caracterizar los estucos mayas y a experimentar sobre su proceso de elaboración; aplicándose más tarde al campo de la conservación y restauración.

La presente investigación, se desarrolla en el marco del *Proyecto La Blanca* y concretamente focaliza sus objetivos en el sitio arqueológico del mismo nombre, ubicado en el departamento de Petén, Guatemala. En la Acrópolis de esta antigua ciudad se han hallado gran parte de los revestimientos de estuco que recubrían las estancias y se han intervenido periódicamente en sucesivas campañas de trabajo. De la experiencia *in situ* surgió la necesidad de hallar materiales compatibles con la composición de los estucos que puedan garantizar una intervención eficaz, pero también sostenible.



La metodología empleada se centra en la revisión bibliográfica de los materiales, procesos y técnicas de manufactura maya para la posterior adaptación y reproducción práctica del estuco, en forma de probetas de mortero, que han sido estudiadas tanto en laboratorio como en campo. Los ensayos realizados en laboratorio (en las instalaciones del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio) se enfocan a la caracterización físico-mecánica de los distintos grupos de mortero, prioritariamente en la determinación del comportamiento hídrico; así como en la determinación de su estabilidad mediante ensayos de durabilidad. Por otra parte, los estudios de campo han consistido en la aplicación de dichas probetas sobre soporte pétreo y su exposición al envejecimiento natural en las condiciones climáticas reales del sitio.

Con ambas vías de estudio, se han realizado comparativas y discutido los resultados, que han permitido seleccionar aquel mortero cuyo comportamiento se adapta con mayor afinidad a los materiales originales, a las condiciones climáticas y a las disposiciones del entorno natural. Seleccionado el mortero, se ha confeccionado una propuesta de intervención adecuada a los revestimientos de estuco de La Blanca, indicando los criterios de intervención y las acciones a realizar, y esperando que la accesibilidad a los materiales en el entorno del sitio, pueda en un futuro facilitar su mantenimiento a largo plazo, así como aplicarse a otros sitios arqueológicos del área.

## *Abstract*

*The mural painting, the sculptural reliefs and the architectural coatings are part of the brilliant artistic manifestations that the ancient Mayan culture bequeathed to us. Through the use of colour, form and texture, they modelled the stucco pastes with great prodigy, adorning their monumental constructions. But these works, which are a valuable testimony to the lives of their former inhabitants, are often in an advanced state of deterioration after archaeological excavation, due to harsh environmental conditions, abandonment, burial and exposure to the weather, where they were found for hundreds of years.*

*In addition, the excavation and exposure to light, involves a sudden change of those conditions in which they had been kept in balance, so that the mechanisms of deterioration are triggered quickly. To mitigate it, the tasks of protection, cleaning and reinforcement are essential to ensure its conservation.*

*In the middle of the last century, synthetic products began to be used in the Mayan area, which had worked successfully in some interventions in Europe. A decade later, the negative effects derived from the use of these substances became evident, and the incompatibility of these materials with the environmental conditions of the archaeological sites of the Maya area was confirmed. From these experiences and the interest in recovering traditional techniques and related materials, began the study and characterization of Mayan stuccos, also the experimentation on their elaboration process; applied later to the field of conservation and restoration.*

*The present research is developed under “Proyecto La Blanca” and specifically focuses its objectives on the archaeological site with that name, located in the department of Petén, Guatemala. In the Acropolis of this ancient city, a large part of the stucco coatings covering the rooms have been found and they have been periodically intervened in successive work campaigns. From the in situ experience arose the need to find materials compatible with the composition of the stuccos which can guarantee an effective intervention, but also sustainable.*

*Used methodology focuses on the bibliographic review of materials, processes and techniques of Mayan manufacture for the subsequent adaptation and practical reproduction of stucco, in form of mortar test, which have been studied both in laboratory and in field. Tests carried out in laboratory (at the facilities of the University Institute of Heritage Restoration) focus on the physico-mechanical characterization of the different mortar groups, primarily in determination of water behaviour; as well as in determination of its stability through durability tests. On the other hand, in field studies mortar tests have been applied on stone support and their exposure to natural aging in the actual climatic conditions of the site.*

*With both ways of study, comparisons have been made and the results have been discussed, which have allowed selecting the mortar whose behaviour adapts with greater affinity to the original materials, to the climatic conditions and to the dispositions of natural environment. Once mortar has been selected, an adequate intervention proposal for the stucco coatings of La Blanca has been made, indicating the intervention criteria and the actions to be carried out, and hoping that the accessibility to the materials in the environment of the site can in the future facilitate its long-term maintenance, as well as be applied to other archaeological sites in the area.*

## Resum

La pintura mural, els relleus escultòrics i els revestiments arquitectònics formen part de les brillants manifestacions artístiques que ens va llegar l'antiga cultura maia. Mitjançant l'ús del color, la forma i la textura, van modelar les pastes d'estuc amb gran prodigi, engalanant les seues monumentals construccions. Però aquestes obres, que suposen un valuós testimoni de la vida dels seus antics habitants, sovint es troben en un avançat estat de deterioració després de l'excavació arqueològica, a causa de les dures condicions ambientals, d'abandó, de sepultura i d'exposició a la intempèrie en les quals es van trobar durant centenars d'anys.

A més l'excavació i exposició a la llum, suposa un canvi brusc d'aqueixes condicions en les quals s'havien mantingut en equilibri, pel que els mecanismes de deterioració es desencadenen ràpidament. Per a mitigar-ho, les tasques de protecció, neteja i reforç resulten indispensables per a garantir la seua conservació. A mitjan passat segle XX, es van començar a emprar en àrea maia diferents productes sintètics, que havien funcionat amb èxit en algunes intervencions, a Europa. Una dècada després, els efectes negatius derivats de l'ús d'aquestes substàncies es van fer patents, i va quedar constatada la incompatibilitat d'aquests materials amb les condicions mediambientals amb què compten els llocs arqueològics de l'àrea maia. D'aquestes experiències i de l'interés per recuperar les tècniques tradicionals i els materials afins, es van començar a estudiar i caracteritzar els estucs maies i a experimentar sobre el seu procés d'elaboració; aplicant-se més tard al camp de la conservació i restauració.

La present investigació, es desenvolupa en el marc del *Projecte La Blanca* i concretament focalitza els seus objectius en el lloc arqueològic del mateix nom, situat en el departament de Petén, Guatemala. En l'Acròpoli d'aquesta antiga ciutat s'han trobat gran part dels revestiments d'estuc que recobrien les habitacions i s'han intervingut periòdicament en successives campanyes de treball. De l'experiència *in situ* va sorgir la necessitat de trobar materials compatibles amb la composició dels estucs que puguen garantir una intervenció eficaç, però també sostenible.

La metodologia emprada se centra en la revisió bibliogràfica dels materials, processos i tècniques de manufactura maia per a la posterior adaptació i reproducció pràctica de l'estuc, en forma de provetes de morter, que han sigut estudiades tant en laboratori com en camp. Els assajos realitzats en laboratori (en les instal·lacions de l'Institut Universitari de Restauració del Patrimoni) s'enfoquen a la caracterització físic-mecànica dels diferents grups de morter, prioritàriament en la determinació del comportament hídric; així com en la determinació de la seua estabilitat mitjançant assajos de durabilitat. D'altra banda, els estudis de camp han consistit en l'aplicació d'aquestes provetes sobre suport petri i la seua exposició a l'envelliment natural, en les condicions climàtiques reals del lloc.

Amb totes dues vies d'estudi, s'han realitzat comparatives i discutit els resultats, que han permés seleccionar aquell morter amb el comportament que millor s'adapta amb els materials originals, a les condicions climàtiques i a les disposicions de l'entorn natural. Seleccionat el morter, s'ha confeccionat una proposta d'intervenció adequada als revestiments d'estuc de la Blanca, indicant els criteris d'intervenció i les accions a realitzar, i esperant que l'accessibilitat als materials a l'entorn del lloc, pugui en un futur facilitar el seu manteniment a llarg termini, així com aplicar-se a altres llocs arqueològics de l'àrea.

## Agradecimientos

La presente investigación no se podría haber llevado a cabo sin la ayuda de muchas personas y organismos que a lo largo de estos años han contribuido directa o indirectamente a que hoy sea una realidad.

En primer lugar me gustaría agradecer profundamente a mi directora, Begoña Carrascosa el haberme brindado la oportunidad de conocer Guatemala y descubrirme el interés por la cultura maya. Gracias por su ayuda y apoyo constante en este largo viaje. Gracias por creer en mi.

Al Vicerrectorado de Alumnado y Extensión Universitaria de la *Universitat Politècnica de València*, por su confianza depositada; así como a los Proyectos “*La arquitectura maya. Sistemas constructivos y conservación*” (BIA2011-28311-C02- 01) y “*Arquitectura maya. Sistemas constructivos, estética formal y nuevas tecnologías*” (BIA2014-53887- C2-1-P); ambos financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación del gobierno Español, y sin los cuales esto no hubiera sido posible.

Al Proyecto La Blanca, esa gran familia con la que he crecido tanto en lo profesional como en lo personal y de la que siempre guardaré buenos recuerdos. Especialmente gracias a sus directores los doctores Cristina Vidal y Gaspar Muñoz por depositar su confianza en mi trabajo y animarme a seguir hacia adelante. Por enseñarme a mirar siempre el lado bueno de las cosas y a no rendirse ante la adversidad.

A todos los compañeros de campo a los que he tenido la suerte de conocer en las sucesivas campañas de trabajo; que me han ayudado incondicionalmente, y con los que he vivido y compartido aventuras inolvidables. Gracias a Patricia Horcajada, Nuria Feliu, Andrea Peiró, Zacarías Herguido, Rosana Martínez, Andrea Aliperta, Riccardo Monturi, Laura Gilabert, Juan Ruiz, Ester Parpal y Miriam Salas.

A Don Haroldo Tezucún, por ayudarme en la tarea de identificar las especies arbóreas entre la espesura de la selva y a recopilar las materias primas para la realización de las probetas. Pero sobretodo por compartir con emoción su sabiduría.

A los vigilantes de La Blanca Don Salomón Rosado y Don Maynor Oliveros por su ayuda en la ardua labor de construir una calera.

Al doctor Oscar Quintana por auxiliarme en el último momento cuando no encontrábamos cal y el tiempo se agotaba.

A los amigos Herman y Walfre por acompañarnos cada día y regalarnos su alegría.

Me gustaría también agradecer su apoyo al Parque Nacional Arqueológico Yaxhá-Nakum-Naranjo, en Petén, por las muestras de cal aportadas a lo largo de esta investigación, y especialmente expresar mi agradecimiento a Raúl Noriega por sus consejos y su generosidad.

A la técnico del Servicio de Difracción de rayos x del Parque Científico de la *Universitat de València*, Alicia Mestre, por su ayuda en los análisis químicos de RXD.

Al Laboratori d'Anàlisi i Diagnòstic d'Obra d'Art de la Facultat de Geografia e Historia de Valencia por concederme la oportunidad de realizar los análisis de Difracción de rayos x (XRD). Especialmente, quiero dar las gracias a la doctora M<sup>a</sup> Luisa Vázquez de Ágredos por todo el tiempo que me ha dedicado; gracias por compartir conmigo sus conocimientos y recomendaciones, y gracias por transmitirme siempre una energía y perseverancia admirables.

Al Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la *Universitat Politècnica de València* por brindarme el acceso y la posibilidad de realizar los ensayos de compresión en sus instalaciones. En especial mi agradecimiento al Técnico Superior de Laboratorio Rafael Molina por su ayuda y dedicación desinteresada.

Al Departamento de análisis físico-químico del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la *Universitat Politècnica de València*, por permitirnos disponer del equipamiento, y principalmente a Laura Osete por su ayuda y su amabilidad, y a Jose Luis Regidor y Xavi Mas por facilitarme amablemente el equipamiento necesario.

Al personal del Servicio de Microscopía Electrónica del Vicerrectorado de Investigación de la *Universitat Politècnica de València* por su atención y amabilidad.

A Olga Medina y a Katia Santos, compañeras de campañas. Por todos los buenos momentos en campo y en laboratorio. Gracias por estar siempre ahí.

A Amparo Linares, Carmen Díaz y Cristina Nieto por su compañía, su ayuda y su apoyo moral durante todo este tiempo; por endulzar los malos momentos, por esos cafés terapéuticos en el Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio.

A Gemma Barreda y Alejandra Soriano por compartir tertulias y grandes hazañas; por hacer los días de trabajo más llevaderos. Asimismo a mis compañer@s de *Penyeta Roja* por vuestro interés y ánimo constante.

Por último quería agradecer a mi familia su apoyo incondicional, en los buenos y en los malos momentos, durante todos estos años. Gracias a mis padres Germán y Paqui, y a mis hermanas Andrea y Ángela por animarme a alcanzar esta meta. Por no dudar de mi.

Y gracias a Senta, por auxiliarme en el diseño y maquetación de esta tesis. Por su paciencia. Pero sobretodo por cuidarme, por avanzar a mi lado a diario, por levantarme en cada caída e iluminar el camino.

A todos vosotros, infinitamente gracias!!

Vall d'Alba, 16 de Enero de 2019.

*... Tlacuel ta xiliuallauh, tlamacazqui ce atl ytonal; tla ximotecati  
in nonahualtexcalco, oncan tipoctiz, oncan tayauhtiz, oncan yoliz, oncan tlatatiz yn  
nohueltiuh yztac cihuatl...* [Ven aquí genio, cuya dicha consiste en las aguas, tiéndete  
en mi encantado horno de cal, allí te has de convertir en humo y niebla; con esto se  
engendraré y nacerá mi hermana la mujer blanca (la cal)].

Hernando Ruiz de Alarcón 1629



BLOQUE 1



MARCO TEÓRICO



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

## 1.1 Presentación, motivación e hipótesis de la investigación

El patrimonio arqueológico maya, representa el conjunto de manifestaciones creadas por este pueblo, que identifica y define su manera única de concebir la realidad. En su época de esplendor, los mayas construyeron inmensas y complejas urbes en un medio selvático del que supieron aprovechar y transformar los recursos naturales para el desarrollo de su civilización. Uno de estos materiales imprescindibles, que jugó un papel fundamental, tanto en el avance de la arquitectura como en la vida cotidiana del pueblo maya, fue la cal. Dada la abundancia de materiales calizos que ofrecía la geología del área, aprendieron a transformar la roca en cal, y experimentaron, mejoraron y perfeccionaron las fórmulas con las que obtener distintos derivados para la edificación de sus ciudades.

Uno de estos materiales elaborado es el estuco. Compuesto de cal, *Sascab* y exudados vegetales, estas pastas refinadas se aplicaron como revestimiento tanto interior como exterior de las construcciones, desempeñando una doble función; estética al ofrecer un acabado homogéneo, y pulimentado, y de protección frente a las adversas condiciones del clima tropical. El estuco se empleó además para modelar complejos relieves escultóricos o arquitectónicos y ofreció el sustrato perfecto para la pintura mural, con la que sus ejecutores dejaron plasmadas escenas, fechas y acontecimientos importantes.

Desde su descubrimiento (siglo XVI), gran parte del vasto legado maya se ha perdido, y sus monumentales construcciones se han visto gravemente dañadas. La destrucción, el saqueo, el contrabando, el abandono y la desidia irresponsable, durante conquista española y los siglos posteriores, produjo un aceleramiento en el deterioro de las ruinas expuestas. Pero al igual que hubo destrucción, también hubieron intentos por su conservación, siendo estas acciones duramente criticadas por algunos exploradores e investigadores como John Lloyd Stephen y Alfred Maudslay en el siglo XIX; o Eduard Seler y Teobert Maler a principios del siglo XX. Denunciaron continuamente estos actos contra el patrimonio, publicaron los procesos de deterioro que estaban sufriendo algunos sitios, e incluso realizaron moldes a relieves y esculturas ante el avance de la destrucción, en un intento desesperado de conservar aquellas manifestaciones. El método de investigación y entendimiento de estas ciudades ha ido evolucionando en el transcurso de la historia, desde que se realizaran las primeras descripciones y dibujos de carácter curioso, hasta la consolidación de la idea de bien cultural, identidad del pueblo maya, con valor propio y con la necesidad de ser protegido.

La restauración científica de la pintura mural y los relieves o revestimientos de estuco de la cultura maya comenzó ya entrado el siglo XX. Tras algunas experiencias negativas, derivadas de la importación de productos extranjeros, en boga principalmente en Europa, el planteamiento del problema cambió de rumbo hacia tendencias más afines y compatibles; hacia la sostenibilidad de las intervenciones y hacia la recuperación de las técnicas tradicionales.

La presente investigación se integra dentro del Proyecto La Blanca; proyecto interdisciplinar que forma parte de un Programa Interuniversitario que comprende a la *Universitat de València*, a la *Universitat Politècnica de València* y a la Universidad de San Carlos de Guatemala. El Proyecto comenzó sus labores en el año 2004 bajo la dirección de los doctores Cristina Vidal Lorenzo y Gaspar Muñoz Cosme, y entre los objetivos principales planteados se pretende la investigación arqueológica, el estudio de la arquitectura y la consolidación, restauración y puesta en valor del sitio para ser introducido en pequeñas redes de turismo que aporten beneficios económicos a las poblaciones aledañas.

Debido a los hallazgos acontecidos al comienzo de las excavaciones, en el año 2005 el Proyecto se abre al campo de la conservación y restauración mediante la incorporación de la doctora Begoña Carrascosa Moliner para dirigir tanto las acciones de extracción de urgencia de los restos arqueológicos, como las labores de conservación de los estucos hallados en el interior de las estancias que componen la arquitectura, y su mantenimiento en las sucesivas campañas de trabajo.

En el año 2007, la Dra. Begoña Carrascosa y el Proyecto La Blanca, me brindaron la oportunidad de conocer por primera vez el sitio arqueológico y participar en la campaña que el Proyecto estaba realizando. De esa primera experiencia aprendí el procedimiento arqueológico para liberar los edificios, y asistí con emoción a los descubrimientos de los materiales que se habían conservado sepultados durante cientos de años. Como estudiante de Conservación y Restauración de materiales arqueológicos, he de decir que la monumentalidad de aquellas ruinas me impresionó profundamente, así como el entorno natural que caracteriza la selva del Petén guatemalteco.

Las primeras labores de apoyo en la conservación estaban dirigidas a los estucos de revestimiento de las estancias de la Acrópolis. Aquellos estucos, desprovistos de gran parte de la arquitectura que les da sustento, habían resistido perennemente durante varios siglos, sepultados bajo el derrumbe de los edificios y el manto de la selva; mostrándose frágiles pero firmes a la vez. La fineza superficial, las huellas de color observadas y los numerosos grafitos incisos que presentaban, indicaban la calidad técnica del estuco y el carácter que otorgó a las estancias en su origen. De la observación y tratamiento de estos revestimientos surgió el interés por conocer las técnicas de manufactura y los componentes, así como hallar aquellos materiales más afines para su conservación.

Es sabido que los productos sintéticos, conocidos y empleados ampliamente y desde hace bastante tiempo en Europa, acarrear problemas de incompatibilidad al aplicarse bajo unas condiciones climáticas extremas, propias del clima tropical, por lo que éramos conscientes de que su empleo podría entrañar problemas a largo plazo. Por ello, en estas primeras acciones de urgencia tras la excavación y exhumación de los estucos, la metodología aplicada se basó en limpiezas físico-químicas de los revestimientos, consolidación de abolsamientos o separación entre los estratos, y la realización de morteros perimetrales de refuerzo de las áreas de estuco conservadas, empleando para ello cales y áridos locales o productos comerciales derivados de la cal (PLM-A, de la casa CTS®), siempre afines, que han dado buenos resultados hasta la fecha.

Pero ante la duda de si estos productos tendrían la estabilidad adecuada a largo plazo, y ante la dificultad que supone el transporte de materiales foráneos, comenzamos a cuestionarnos qué materiales y de qué forma procesarlos para garantizar su compatibilidad pero también su eficacia, y poder producirlos en el sitio de forma autosuficiente. Si las técnicas y los materiales empleados por los antiguos mayas proporcionaron unos estucos que han logrado conservarse hasta nuestros días ¿Sería posible basarse en esas técnicas para elaborar los morteros de reintegración?; ¿Se puede garantizar el buen comportamiento del mortero reproducido al aplicarse en las condiciones climáticas del sitio?; ¿Es posible que este mortero cause a largo plazo efectos negativos derivados de la alteración de sus componentes y de la interacción con el soporte donde se aplica?. Si se fomenta el empleo de estos materiales y de las técnicas tradicionales mayas, ¿Se podría contribuir a la autogestión del sitio arqueológico para producir su propio material de conservación, sin necesidad de importar productos extranjeros o adquirir productos comerciales que supongan un gasto económico importante?; ¿Esto facilitaría el mantenimiento del sitio en un futuro y a largo plazo?

Para responder a estas cuestiones se inició este proceso de investigación, focalizado principalmente en la caracterización de las propiedades físicas, mecánicas y químicas de determinados grupos técnicos de mortero, para poder conocer su comportamiento y durabilidad de forma previa a su aplicación, y poder garantizar una intervención eficaz y duradera, siempre que se cumplan las condiciones de mantenimiento y protección de las ruinas.

El presente trabajo es el resultado de un largo proceso de estudio que compagina la investigación de campo y el análisis de laboratorio; que ha volado reiteradamente entre España y Guatemala, y que ha bebido de cada nueva experiencia y de muchas pequeñas aportaciones de maestros y compañeros que lo han enriquecido. Con ello pretendemos contribuir al conocimiento experimental de las técnicas de manufactura mayas y su aplicación en el campo de la conservación de los estucos de revestimiento.

## 1.2 Antecedentes y estado de la cuestión

Alrededor de la segunda mitad del pasado siglo XX, los proyectos arqueológicos y de restauración en el área maya, financiados por los propios países o con ayuda de proyectos extranjeros, comienzan a incrementarse, y los monumentales sitios mayas, absorbidos durante siglos por la selva, comienzan a manifestar los vestigios artísticos que habían permanecido ocultos en su interior, tales como pinturas murales o relieves arquitectónicos revestidos de estuco.

Los principios de la restauración científica se habían formulado al comienzo del siglo, y las teorías de Camilo Boito, Gustavo Giovannoni y Cesare Brandi se fueron asimilando, siendo recogidas en las posteriores Cartas de Atenas y del Restauo, en 1931. Las Cartas de Venecia de 1964, las Normas de Quito en 1968 y la Carta Italiana del Restauo de 1972 (Juárez 2009) también fueron determinantes para que las nuevas teorías y recomendaciones venidas de Europa calaran en una sociedad ya agitada por la situación de cambios político-económicos y sociales<sup>1</sup>, abriendo paso a nuevos enfoques culturales y también a nuevos métodos en el campo de la restauración del patrimonio. Era el final de la época de la reconstrucción al servicio del turismo (Schálvezon 1990); el respeto y la preocupación por la conservación de estas manifestaciones era patente<sup>2</sup>.

Específicamente y como es el caso de estudio, en el campo de la restauración de pintura mural y de las manifestaciones artísticas de estuco, a partir de 1960 se desarrollan dos corrientes paralelas en la investigación y metodología práctica de las intervenciones, que determinarán el futuro de la restauración (y de la conservación) de estas manifestaciones en los sitios arqueológicos de México principalmente, y en general del área maya.

<sup>1</sup> En México, *Las nuevas generaciones veían críticamente lo realizado, y a raíz de los movimientos de 1968 (movilizaciones sociales reclamando un cambio democrático en el país, mayores libertades políticas y civiles, menor desigualdad y la renuncia del gobierno autoritario), se replanteaban la historia misma de la antropología mexicana, pidiendo una revisión a fondo de muchos hechos de la cultura (Schálvezon 1990).*

<sup>2</sup> Este tema se desarrollará en el siguiente capítulo 2: *El patrimonio arqueológico Maya.*

### 1.2.1 Corriente tecnológica

Las décadas de los 60 y 70 constituyen el periodo culminante en el que numerosos especialistas fueron introduciendo los materiales, procesos y técnicas que se empleaban en Europa y que hasta el momento estaban dando muy buenos resultados<sup>3</sup>. Si bien la época de la reconstrucción y del cemento daba los últimos coletazos, todavía era habitual el empleo abusivo de cemento para elaborar morteros de reintegración, de inyección y de refuerzo de los aplanados que componen la pintura mural, o para los estucos de revestimiento de relieves ornamentales. Los materiales tradicionales “pasan de moda” y hay una cierta tendencia a buscar y creer que los productos fruto de las nuevas tecnologías aportan la solución a los problemas de deterioro.

Pero los productos estrella que fueron empleados abusivamente son sobretodo resinas acrílicas y vinílicas (Etil-metacrilato, resina acrílica en dispersión acuosa y acetato de polivinilo). Encontramos intervenciones con *Laca Dulux* (barniz) diluida como fijativo de estratos pictóricos en Teotihuacan y Monte Albán (México) en 1945 (Angulo 2003); Paraloid® B-72 y Silicato de etilo H, como consolidante en los mascarones de estuco de Kohunlich (QRoo), aplicado sucesivamente desde 1969 hasta 1984 (López 1999), o resinas acrílicas en dispersión como Primal® y Acril® 33, aplicadas en el Templo Mayor de Teotihuacan y en otros sitios de Campeche, Yucatán, Chiapas y QRoo, en esta misma década (Magaloni 1992). Estos materiales sintéticos se emplearon como consolidantes de pintura mural y estucos, pero también en la elaboración de pastas para relleno de oquedades y grietas, o en refuerzos perimetrales. La facilidad de preparación así como la eficacia que mostraban inmediatamente, sobretodo en la fijación de estratos pictóricos, produjeron la automatización de su empleo en las labores de restauración (*ibíd*).

Estos productos sintéticos presentaban bajo ensayo buenas propiedades de estabilidad físico-química y de durabilidad, por lo que fueron elegidas de entre todas las variantes sintéticas por poseer las mejores propiedades. Pero lejos de ofrecer solución al problema, comenzaron a surgir complicaciones derivadas de su aplicación alrededor de una década después. En 1991, gracias a la tesis de Licenciatura de Luciano Cedillo (1991) *La conservación en zonas arqueológicas: Tres décadas de trabajo.*, los daños causados por la aplicación reiterada de estos productos quedaron patentes. De entre los problemas observados, diversos restauradores destacan el cambio en la apariencia de la superficie por la creación de una capa translúcida, a veces amarillenta, que se desquebraja y desprende junto al estrato pictórico, en el caso de pinturas (López 1999); disgregación y desprendimientos superficiales por la presencia de sub-eflorescencias, desarrolladas por la obstrucción de la porosidad superficial del material con la resina, y la no transpiración de éste. Estas resinas (especialmente las acrílicas) engloban las partes pulverulentas de la superficie en una película transparente, que con el tiempo tiende a amarillear o oscurecer, y a perder su elasticidad (reticulación o *cross-linking*), incrementándose su irreversibilidad (Osca 2005). Si a esto le sumamos las condiciones climáticas del área en la que se suelen enclavar estos sitios (alta humedad relativa, alta temperatura y altas radiaciones lumínicas, si no está protegida la obra), el envejecimiento de estos materiales se acelera gravemente. A pesar del testimonio y la

<sup>3</sup> A partir de los años 70 comienza la era de los “superpolímeros”; en ella tuvieron lugar múltiples descubrimientos científicos y tecnológicos, debido al incremento de científicos, empresas productoras de polímeros, y al desarrollo de proyectos de investigación, que crean constantemente nuevos materiales (García 2009).

advertencia que supuso este trabajo (Cedillo 1991), todavía encontramos informes de restauración de la década de los 90 y de la primera década del siglo XXI, donde se emplean estos productos. Por ejemplo en el tratamiento del relieve de estuco de la Estructura XIX de Palenque (Valle y Alfonso 1999), en el de los acabados arquitectónicos de Mayapán, Yucatán, entre 1996 y 1999 (Solís *et al.* 2010); así como recomendaciones del empleo de acetato de polivinilo (PVA) o “cola blanca” para la consolidación de estucos y la aditivación de morteros de cal (Ramírez 2006; Valdés *et al.* 2001).

Otro procedimiento, derivado del empleo de materiales plásticos, que causó graves daños indirectos en los relieves de estuco (y que a día de hoy podemos encontrar en algunos sitios del área), es la instalación de cubiertas plásticas (generalmente de poliéster o policarbonato), que aunque protegen de la lluvia, dejan pasar las radiaciones lumínicas, creando un microclima perfecto para la proliferación de microorganismos y la cristalización de sales. Un ejemplo lo describe Rudy Larios en referencia al deterioro sufrido por el friso de la Acrópolis central y dos mascarones de las estructuras 5D-22 y 5D33 en Tikal; que fueron cubiertas de 1966 a 1969 con este tipo de materiales, y sólo un año después (1970) presentaban un estado alarmante de pérdida (Larios 1995).

### 1.2.2 Corriente tradicional

A pesar de la introducción sistemática de los productos sintéticos, la cal y sus derivados (morteros) no dejaron de ser empleados en las labores de conservación en estas décadas; siendo muchos los sitios arqueológicos en los que, o bien por no tener acceso a los productos novedosos y sí a la cal, o bien por simpatizar con unos criterios más respetuosos con la composición original de las obras y los materiales tradicionales, no se llegaron a emplear productos sintéticos en las labores de conservación. La cal se empleó habitualmente en las intervenciones de consolidación de estucos, mediante la aspersión de agua de cal, y para la elaboración de morteros de reintegración. Esta tendencia, en sintonía con las nuevas Recomendaciones Internacionales, se ajusta sobretudo a la compatibilidad de materiales y al respeto por la obra y las condiciones ambientales que le rodean.

A partir de los años 50, en México, se inician varios estudios de caracterización de materiales a raíz de los nuevos métodos de análisis químico surgidos (Jáidar 2006); buscando una aproximación a la composición de las obras del arte maya, y a la comprobación de la presencia de aditivos orgánicos en los estucos y las bases de preparación, tal como narraban los documentos coloniales (De Landa: 2002) y algunos trabajos etnográficos de principio de siglo XX (Morris *et al.* 1931; Standley 1930; Thompson 1932; Satterthwaite 1943). Edwin Littmann, realiza los primeros estudios sobre las características del *Sascab*, árido empleado como carga en los estucos mayas (1958), y sobre el empleo de aditivos vegetales en los estucos (1960). Para ello caracteriza morteros elaborados con extractos de cortezas de Chucum (*Pithecolobium albicans*), Chacté (*Caesalpinia platyloba*), Jabín (*Pescidia Communis*) y Chacá (*Bursera Simaruba*), concluyendo que su adición influye en el proceso de carbonatación y contribuye a producir un mortero más resistente. Diana Magaloni (1990; 2001) retoma el tema de la identificación e influencia de los extractos vegetales en el mortero, llegando a conclusiones similares.

Tras los datos positivos de estos trabajos, se comienzan a realizar experimentaciones *in situ* para labores de conservación, empleando estos extractos como parte compositiva de los morteros de reintegración



y de estratos de sacrificio (Sandoval 1994; García y Valencia 1997), y extendiéndose su uso a sitios como Chicanná, Becán, Calakmul, Ek Balam, Balamkú o Río Béc (Jáidar 2006). La experimentación previa se realiza *in situ* y cada equipo de trabajo emplea su propia metodología basada en la experiencia; se experimenta con diferentes especies arbóreas de las cuales se extraen los exudados de modos distintos, se apaga la cal de diversas formas y se emplean distintos áridos para la conformación del mortero. Pero a pesar de que las intervenciones parecen dar buenos resultados, su comportamiento no está estudiado científicamente. Habrá que esperar hasta 2006, a la tesis de licenciatura de Yareli Jáidar (INAH), centrada en la caracterización de las propiedades físico-mecánicas de morteros de cal con la adición de los extractos de corteza de Pixoy, Chucum, Chakaj y Jolol, con la que concluye que el empleo de estos aditivos mejoran las propiedades mecánicas e hídricas de los morteros. Casi a la vez y después de colaborar en actividades de conservación en Calakmul (Campeche), la Universidad de Florencia realiza tres investigaciones profundizando en la caracterización físico-química de los morteros aditivados con Chucum (Pizzorusso 2005); con Chakaj (Santini 2005); así como del proceso de carbonatación de estas mezclas (Lausser 2006; citados en Jáidar 2006).

Actualmente los exudados orgánicos extraídos de las cortezas de distintos árboles siguen empleándose en las intervenciones de conservación de sitios arqueológicos del área maya; hasta ahora con buenos resultados, tanto como fijativos de películas pictóricas (en el caso de pinturas murales) con agua de Pixoy (Ruz 2009), como en la mezcla de morteros de cal y también como aglutinante de pigmentos en la reintegración cromática (Fuentes y Otero 2010).

A raíz de esta búsqueda por la recuperación de los materiales y técnicas tradicionales, de la compatibilidad de materiales en las intervenciones de restauración, y habiendo visto las graves consecuencias derivadas del empleo de productos sintéticos en las duras e inestables condiciones ambientales del área maya, dos nuevos productos aparecen en escena como consolidantes de materiales calizos: las nanopartículas de hidróxido de calcio y el fluoruro de sodio.

La aplicación de agua de cal como consolidante en pintura mural y estucos era una opción respetuosa e inocua para las obras, pero desafortunadamente no resultaba ser muy efectivo debido a la baja concentración en hidróxido de calcio que se halla en la solución (1,7 g. de hidróxido de calcio por litro de agua (D'Armada 2012; citado en Esquivel y Filloy 2007), lo que obligaba a repetir sucesivamente las aplicaciones para tener un resultado aceptable. Pero esta insistencia derivaba en el aporte excesivo de agua en el material y en la aparición de un velo blanquecino en la superficie de las obras, que en caso de pinturas murales dañaba su visibilidad.

Varios estudios de la Universidad de Florencia lograron suspender partículas nanométricas de hidróxido de calcio (nanocales<sup>4</sup>) en solución alcohólica (Giorgi *et al* 2000, 2002, 2010; Baglioni 2006; Ambrosi 2001, citados en Esquivel y Filloy 2007), consiguiendo mejor penetración del producto en el material por el carácter no polar del alcohol y por el pequeño tamaño de las partículas de cal que se depositan sin obturar los poros del material. Desde principios del siglo XXI viene siendo empleado, en colaboración con proyectos coordinados por el INAH, en distintos sitios del área<sup>5</sup>; mostrando buenos resultados tanto *in situ* como en ensayos de laboratorio con probetas (*ibid*).

<sup>4</sup> Las nanopartículas de hidróxido de calcio, comercializadas bajo el nombre de Nanorestore®, fueron sintetizadas por el Centro Interuniversitario de Estudios de Sistemas de Gran Interfase (CSGI), de la Università Degli Studi di Firenze, Italia.

El fluoruro de sodio fue el producto propuesto por la restauradora Lda. Luisa Mainou (CNCPC-INAH) para el tratamiento de materiales calcáreos, principalmente biominerales, como concha o dientes procedentes de contexto arqueológico (2000). El proceso más que una consolidación se trata de la remineralización; proceso por el que ciertos iones tienden a incorporarse a estructuras minerales con un pH neutro. Esto se da cuando un mineral ha sufrido un ataque ácido y su estructura presenta alteraciones. Durante la remineralización se precipita calcio, fosfato y otros iones en la superficie o en el interior, quedando su estructura reparada (Straulino 2010). Unos años más tarde, Luisa Straulino (2010a; 2010b; 2012) presenta su tesis de licenciatura donde estudia la viabilidad de remineralizar la piedra caliza disgregada con fluoruro de sodio. El caso de aplicación es la cornisa del edificio 5N2, Grupo A en el sitio de Rio Bec, Campeche. Su estudio aporta buenas conclusiones sobre la efectividad de este método en piedra caliza, si bien advierte de la formación de sales de sodio tras el tratamiento (2010a).

Como se ha expuesto, los estudios científicos enfocados al área de la conservación y restauración de pintura mural y estucos son relativamente recientes. Por suerte (y por desgracia para las obras deterioradas) las malas experiencias derivadas de la aplicación de productos sintéticos a finales del siglo XX mostraron que ese no era el camino a seguir, abriéndose la vía hacia el empleo de materiales compatibles, hacia la re-tratabilidad de las intervenciones y hacia la recuperación de las materias primas, los procesos y las técnicas de manufactura maya.

Actualmente la tendencia al empleo de morteros de cal aditivados con extractos vegetales está en auge, y cada vez más equipos de restauración tienden a emplearlos. Pero que estos materiales sean compatibles con las técnicas originales no significa que sean adecuados para las labores requeridas, y por ello es imprescindible realizar un estudio exhaustivo del comportamiento a largo plazo y en las condiciones ambientales en las que va a ser aplicado. En este sentido, destaca el trabajo en profundidad de Yáreli Jáidar (2006), que aún el estudio *in situ*, en las condiciones reales, y el estudio en laboratorio de caracterización de las propiedades físico-mecánicas de estas combinaciones de morteros y extractos vegetales.

A pesar de que generalmente se realizan pruebas experimentales *in situ* para la selección de materiales y sus mezclas antes de la aplicación, creemos que es imprescindible la profundización en el estudio de estos productos manufacturados, sobretodo para la previsión de su comportamiento hídrico, de su resistencia a la cristalización de sales, y en general de la durabilidad de estos morteros. Uno de los principios fundamentales que impulsa el empleo estas mezclas es el manejo de materias primas locales para acercarse a las técnicas originales, pero también para fomentar la autogestión de los sitios gracias a la accesibilidad y bajo coste que suponen estos materiales. Pero estas materias pueden contener compuestos que produzcan reacciones indeseadas al mezclarse y ponerse en obra (sales, reacciones entre ellas), de ahí la necesidad de garantizar su utilización previamente.

<sup>5</sup> Los primeros procedimientos realizados con éxito se llevaron a cabo en Florencia, Italia, con la restauración de las pinturas murales de Santi di Tito, en la Catedral de Santa María del Fiore y la pintura mural de Andrea da Firenze en la Capellone degli Spagnoli en Santa Maria Novella. En México, los primeros resultados positivos se obtuvieron en la pintura mural de Calakmul, Campeche, en las pinturas murales de la Caja de Agua, en la zona arqueológica de Tlatelolco, en las pinturas de Los Bebedores, en Cholula, Puebla y en Mayapán, Yucatán (Castro et.al 2013).

## 1.3 Objetivos

Los objetivos establecidos en la elaboración de esta tesis son:

### 1.3.1 Objetivo general

- Contribuir al conocimiento científico de las técnicas tradicionales mayas de elaboración de estucos de cal, mediante su reproducción y estudio; garantizando la viabilidad de ser aplicados en el campo de la conservación y restauración de sitios del área maya, favoreciendo las intervenciones de carácter sostenible.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar la bibliografía existente acerca de las técnicas de manufactura mayas, a través de las fuentes etnohistóricas, etnográficas y científicas, determinando los procesos de apagado de la cal y las materias primas referenciadas en la literatura, seleccionando de ellas las que se encuentren disponibles en el entorno de La Blanca.
- Realizar un estudio profundo del sitio objeto de estudio (La Blanca, Petén, Guatemala), analizando los agentes de deterioro que provocan los daños en los estucos y determinando la evolución de su estado de conservación, desde la primera excavación en el sitio, para comprender los procesos físico-mecánicos de alteración y proponer la intervención más adecuada.
- Realizar cuatro grupos de mortero, utilizando cuatro métodos de apagado de la cal determinados, dos áridos abundantes en área maya (*Sascab* y árido del sitio), y tres extractos vegetales procedentes de las cortezas de los árboles Ramón (*Brosimum Alicastrum*), Pixoy (*Guazuma Ulmifolia*) y Habín (*Piscidia Piscipula*).
- Determinar el comportamiento hídrico de cada tipo de mortero para poder comparar entre ellos los grados de absorción de agua y su permeabilidad al vapor de agua
- Caracterizar las propiedades mecánicas de resistencia a la adhesión al soporte, al desgaste por rozamiento y a la compresión que cada tipo de mortero presenta, determinando así su adherencia, compactación y dureza.
- Determinar la durabilidad de cada grupo de mortero mediante envejecimientos artificiales de exposición a la radiación ultravioleta; ciclos de exposición a humedad y temperatura, resistencia a la cristalización de sales y resistencia al choque térmico; evaluando los cambios cromáticos, químicos y de comportamiento hídrico experimentados.
- Exponer en La Blanca los distintos morteros elaborados, en el soporte original y en las condiciones climáticas naturales del sitio, y realizar un seguimiento de su envejecimiento, evaluando el deterioro superficial mediante la medición del agua absorbida y la inspección visual.

- Seleccionar aquellos morteros que, siguiendo las técnicas de manufactura prehispánica, hayan respondido mejor a los ensayos y cumplan los requisitos establecidos para el mortero de reintegración.
- Desarrollar una propuesta metodológica de restauración para los estucos del sitio arqueológico La Blanca, estipulando los procesos y materiales requeridos para la elaboración del mortero seleccionado, su forma de aplicación, así como proporcionar algunas recomendaciones para el correcto mantenimiento del sitio.

## 1.4 Metodología

Para llevar a cabo esta investigación se ha precisado de varias localizaciones comprendidas entre Guatemala y España. En el sitio arqueológico La Blanca y en el laboratorio del Proyecto sito en Flores (en el departamento de Petén, Guatemala), se ha recolectado y procesado la materia prima, y se han elaborado las probetas de mortero. Por otra parte, en el Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la UPV (en Valencia, España), se ha llevado a cabo la fase experimental de laboratorio. Se ha determinado la siguiente metodología, diferenciada en cuatro fases:

### PRIMERA FASE

En primer lugar y recogido en los capítulos 1, 2 y 3, se ha llevado a cabo una minuciosa revisión bibliográfica que ha servido para establecer el marco teórico de conocimiento, estudiando por una parte el proceso histórico por el que la conservación del patrimonio Maya ha transcurrido, y por otro lado se ha recabado la información de las fuentes etnohistóricas y etnográficas, que han aportado los datos necesarios para el conocimiento de los materiales, procesos y técnicas empleados por los antiguos mayas para la elaboración de sus estucos. Dicha información ha permitido enmarcar el estado de la cuestión actual acerca de los materiales y métodos empleados hasta la actualidad en la conservación de estucos de sitios arqueológicos del área maya.

### SEGUNDA FASE

En segundo lugar y recogido en el capítulo 4, se ha recabado la información práctica, obtenida de las distintas campañas de trabajo, en las que hemos podido participar desde el año 2007 junto al Proyecto Arqueológico La Blanca, realizando labores de conservación de los estucos que recubren el interior de las estancias de la Acrópolis. Con el transcurso de casi catorce temporadas desde que comenzara el Proyecto en 2004, se han podido evaluar:

- Los principales factores de deterioro que circundan el sitio, y que afectan directamente a la conservación de los estucos. Para ello se ha realizado el control y registro de las condiciones climáticas así como de los daños aparecidos en las sucesivas campañas.
- La respuesta de los tratamientos de conservación que se han ido realizando en las sucesivas campañas mediante la inspección visual.

Así mismo, el trabajo *in situ* ha permitido el reconocimiento del entorno natural del sitio y la selección de aquellas materias primas vegetales y minerales, abundantes y accesibles, que puedan proporcionar el material necesario en las labores de conservación, promoviendo la autogestión del sitio y con ello facilitar su mantenimiento en el futuro.

### TERCERA FASE

En tercer lugar y aprovechando las campañas de trabajo *in situ*, se han recolectado en el entorno de La Blanca los materiales seleccionados previamente en la primera fase, y se han elaborado tres grupos de mortero de cal con cuatro variaciones técnicas que atienden al método de apagado de la cal, a la forma de añadir los extractos vegetales, al porcentaje de concentración de estos extractos, y al tipo de árido empleado. Las probetas se han elaborado en el laboratorio del Proyecto, sito en la isla de Flores, Petén, Guatemala. Con el objetivo de estudiar su alterabilidad/estabilidad, el estudio se ha llevado a cabo mediante dos vías:

- o Ensayos de laboratorio: Realizados en las instalaciones del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio (IRP) de la *Universitat Politècnica de València*, en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la *Universitat Politècnica de València*, y en el Servicio de Difracción de rayos x del Parque Científico de la *Universitat de València*. El estudio de laboratorio se centra en la caracterización físico-mecánica de las propiedades de los morteros creados y de su durabilidad, aplicando para ello los siguientes métodos:
  - Determinación de la absorción de agua por capilaridad.
  - Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica.
  - Determinación de la permeabilidad al vapor de agua.
  - Determinación de la resistencia a la adhesión al soporte.
  - Determinación de la resistencia a la abrasión.
  - Determinación de la resistencia a la compresión.
  - Determinación de la resistencia a la cristalización de sales.
  - Determinación de la resistencia al choque térmico.
  - Determinación de la resistencia a la degradación cromática por exposición a las radiaciones ultravioleta.
  - Determinación de la resistencia a la degradación por ciclos acelerados de humedad y secado.

- o Envejecimiento natural por exposición *in situ*: Los morteros elaborados en Guatemala se han aplicado en el sitio La Blanca a modo de probetas, ubicándose en el mismo sitio y condiciones climáticas en las que se ubican los estucos originales, y en las que se aplicarían los morteros de reintegración en las futuras fases de restauración. Estos morteros, aplicados entre 2013 y 2016, se han supervisado en las posteriores campañas, evaluando daños como fisuras, fracturas o desprendimientos, así como la erosión superficial mediante la inspección visual y la realización de ensayos de penetrabilidad de agua.

#### CUARTA FASE

Por último, se ha recabado la información obtenida por ambas vías de estudio, procediendo a su discusión y extracción de conclusiones en base a la comparativa de resultados. Con ello se ha seleccionado el mortero que mejores cualidades ha mostrado en las diferentes fases de ensayo y que reúne los requisitos necesarios para poder ser empleado en las labores de conservación de los estucos de La Blanca; así como de otros sitios del área maya que compartan unas condiciones medioambientales similares. Se ha redactado una propuesta metodológica para intervenir los estucos del sitio, describiendo las acciones primordiales para la intervención; el método y materiales necesarios para la reproducción del mortero seleccionado, la selección de las zonas a reintegrar y la forma de aplicarlo, y por último algunas recomendaciones para garantizar la eficacia de la intervención y el correcto mantenimiento a largo plazo.

Para una mejor comprensión espacio-temporal de las distintas fases de la investigación, su organización e infraestructura empleada, se ha realizado un mapa conceptual por orden cronológico:

# FASES DE LA INVESTIGACIÓN

**1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**  
 2008-2018  
 España - Guatemala

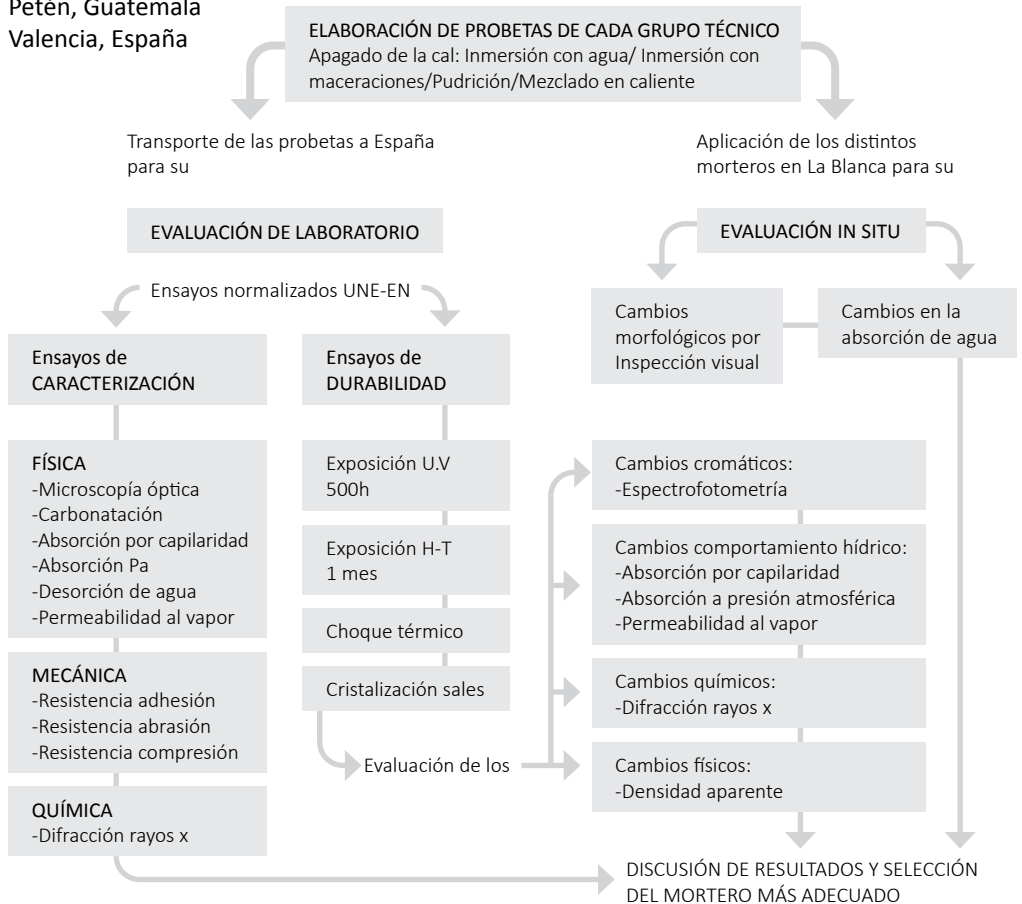
Revisión de las fuentes históricas, etnográficas y científicas que proporcionen información sobre materiales, procesos y técnicas de elaboración de los estucos mayas. Determinación de los materiales constituyentes.

**2 APROXIMACIÓN AL LUGAR DE ESTUDIO**  
 2007-2018  
 Petén, Guatemala

Participación en las campañas de conservación en el sitio arqueológico La Blanca, reconocimiento del problema y la necesidad de su investigación. Reconocimiento del entorno de La Blanca y de las materias primas disponibles en base a las fuentes bibliográficas consultadas.

**3 FASE EXPERIMENTAL**  
 2011-2016  
 Petén, Guatemala  
 Valencia, España

Recopilación de materia prima en el entorno de La Blanca: Cal, áridos, cortezas de árboles y agua.



**4 PROPUESTA DE INTERVENCIÓN**

Seleccionado el mortero idóneo, se ha propuesto un modelo de intervención, teniendo en cuenta los requerimientos de los estucos de La Blanca; su deterioro y las causas de alteración presentes en el sitio. Se especifica el modo de proveer la materia prima necesaria y su procesado, el modo de aplicación del mortero y las acciones fundamentales para garantizar el éxito de la intervención y el mantenimiento de los estucos a largo plazo.

## 1.5 Organización del documento

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, el presente documento contiene dos bloques distinguidos; el Bloque 1 comprende el marco teórico fundamental, dividido en cuatro capítulos. El Bloque 2 comprende la fase experimental de ensayos y propuesta de intervención, recogidas en dos capítulos más, contando el documento con un total de seis capítulos.

### BLOQUE 1

#### CAPÍTULO 1

El primer capítulo, de carácter introductorio, supone la primera toma de contacto con el tema objeto de estudio. En él se comenta la motivación que condujo al desarrollo de la investigación y las preguntas que surgieron en ese primer momento y que dieron pie al planteamiento de los objetivos y a la planificación de la metodología de la investigación. De forma sucinta se describe el estado de la cuestión actual que supone el punto de partida de comienzo esta tesis doctoral.

#### CAPÍTULO 2

Describe de forma concisa el panorama de la conservación del patrimonio arqueológico maya desde el periodo de ocupación original hasta nuestros días. Se destacan los hechos político-económicos y sociales más relevantes que contribuyeron al impulso de la conservación y restauración del patrimonio maya, las primeras acciones conservativas y la evolución de los criterios de restauración, principalmente en México por ser el país precursor, y en general en el área maya.

#### CAPÍTULO 3

Estudia profundamente la naturaleza y carácter de los estucos mayas desde diversas perspectivas; comenzando por una breve introducción a la arquitectura maya, soporte fundamental del estuco; su función social y conservativa, las técnicas artísticas asociadas, y por supuesto los materiales compositivos y los procesos de elaboración mayas, basados en las fuentes bibliográficas consultadas (coloniales, etnohistóricas y etnográficas), que han determinado los conceptos teóricos necesarios para llevar a cabo la selección de materiales en la fase experimental.

#### CAPÍTULO 4

Supone la presentación del sitio arqueológico La Blanca. Se describe su contexto histórico y temporal, su entorno geográfico, y su función social; describiendo las estancias más importantes de su estructura principal: la Acrópolis. Así mismo se realiza una caracterización organoléptica, química y de comportamiento hídrico de los estucos conservados e intervenidos; se evalúa su estado de conservación, determinando las causas de alteración presentes en el sitio y que han intervenido en los procesos de deterioro y se describen las acciones conservativas realizadas por el Proyecto sobre los estucos de revestimiento de las distintas estancias.



## BLOQUE 2

### CAPÍTULO 5

Corresponde a la fase experimental de esta tesis, donde se pone en práctica la información recopilada en las fuente bibliográficas (Capítulo 3). Se describen y justifican los materiales, procesos y técnicas de elaboración seleccionadas para realizar los distintos grupos de mortero. Se justifica la elección de los ensayos de laboratorio realizados, así como se expone su desarrollo y los resultados obtenidos. También se describen en este capítulo los resultados del envejecimiento natural que han mostrado los estucos expuestos en La Blanca. Finalmente se discuten los resultados obtenidos por ambas vías de estudio y se selecciona un mortero en base al comportamiento observado en el estudio, y a la adecuación a los requerimientos.

### CAPÍTULO 6

Se presenta una propuesta metodológica para la intervención de los estucos de La Blanca en base al mortero seleccionado en la fase experimental. Se describen los principios deontológicos que rigen una intervención arqueológica de carácter sostenible, así como los pasos necesarios para realizarla; detallando el modo de recolectar y procesar los materiales, el modo de elaborar el mortero seleccionado y las indicaciones para seleccionar las zonas de tratamiento y aplicación del mortero. Finalmente se recomiendan unas acciones fundamentales a tener en cuenta para garantizar el éxito de la intervención así como su mantenimiento a largo plazo.

En base a estos seis capítulos que recogen tanto el marco teórico como la fase experimental de la investigación, se han elaborado unas conclusiones finales que evalúan los resultados obtenidos, su adaptación a los objetivos planteados, así como algunas cuestiones que pueden mejorar y completarse en próximas líneas de actuación.

Finalmente se listan las referencias bibliográficas empleadas en el documento así como la bibliografía general consultada.



# CAPÍTULO 2

## EL PATRIMONIO ARQUEOLÓGICO MAYA

De forma complementaria al estado de la cuestión descrito en el punto 1.2 de la introducción, en el presente capítulo se retrata una sucinta aproximación histórica al panorama en el campo de la conservación del patrimonio maya y su evolución en el tiempo; desde los primeros actos de conservación realizados por sus propios creadores hasta el final del siglo XX, cuando se toma plena conciencia de la necesidad de salvaguardar el patrimonio y de un marco teórico y legal definido que lo ampare. Dada la extensión geográfica del patrimonio arqueológico maya, que abarca gran parte de los actuales países de Guatemala, Belice, El Salvador, Honduras y México; la narración de este capítulo se centra en los países de México y Guatemala; el primero por ser el país a la vanguardia en el desarrollo de proyectos arqueológicos y de restauración, y el segundo por ser el país donde se ubica el sitio arqueológico objeto de esta tesis y por cuya ley se rige su protección.

## 2.1 Conservación en la cultura maya

Durante el desarrollo de la civilización maya, se sucedieron conquistas y dominaciones por parte de otros grupos. Las construcciones eran remodeladas mediante anexos o modificaciones de las preexistentes, o mediante la sepultura y superposición de nuevas construcciones. Esta superposición con la que se conseguía el cese y ocultación de las anteriores construcciones pertenecientes a otro grupo, siempre se realizó con sumo cuidado, sin el ánimo de destruir o dismantelar el edificio anterior. Ejemplos de buena conservación gracias a este método son el Templo de Rosalila, en Copán, Honduras o la subestructura de El Castillo en Tulum, aislada con un muro relleno de arena para sellar y proteger sus pinturas antes de construir sobre ella.

Otra dato que nos demuestra la preocupación de los antiguos habitantes de estos edificios por proteger sus obras nos lo da el registro arqueológico de la arquitectura monumental, donde se han hallado con frecuencia partes conservadas de estuco con diversas superposiciones, llegando a encontrarse revestimientos con 15 o 20 capas (Schávelzon 1990:13). Asimismo se han hallado reparaciones sobre orificios o grietas en antiguos paramentos, sellados mediante la aplicación de otros estucos, generalmente más toscos, pertenecientes a etapas posteriores. Un buen ejemplo sobre la reparación de estucos deteriorados lo encontramos en la Acrópolis de La Blanca, en el cuarto 6J2-11, donde se observan varios parches de mortero de cal sobre grietas del muro este, con un color y una textura menos refinada. También es destacable el hecho de que en la subestructura de esta misma Acrópolis, se hallaran pinturas murales bajo una lechada de cal, cuidadosamente aplicada, antes de sepultar la estancia, y gracias a la cual se han conservado hasta nuestros días.

Además de la ventaja constructiva que supone el aprovechamiento de un edificio anterior, los mayas mostraron un profundo respeto por las obras constructivas y artísticas realizadas por los grupos que les antecedieron, tomándose tiempo y esmero en sellar cuidadosamente estas obras en un acto de anular conservando, de mantener oculto el pasado y prolongarlo al presente.

## 2.2 El patrimonio maya bajo la dominación española

A la llegada de Colón a América en 1542 e inicio de la conquista española, las grandes urbes de la época de esplendor maya ya se encontraban abandonadas y en ruinas tras el periodo conocido como “colapso”<sup>1</sup>; encontrándose el territorio maya dominado por varios reinos rivalizados. El primer contacto entre mayas y europeos tuvo lugar en 1511 en la costa de Yucatán a causa de un naufragio de los conquistadores, y duraría hasta 1697, fecha en la que tiene lugar la derrota del último grupo indígena, el pueblo Itzá, asentado en Petén, Guatemala.

La conquista española supuso la destrucción del legado indígena, y aunque no nos extenderemos en este tema<sup>2</sup>, supuso una ruptura cultural, una pérdida de la herencia indígena a las siguientes generaciones y el olvido de aquello que crearon sus antepasados. Si bien en el primer siglo de la dominación española los conquistadores se dedicaban a quemar códices, destruir ídolos, saquear templos o prohibir la cultura y la religión indígena por imposición ideológica; existen muchos relatos descriptivos donde se enaltece la grandiosidad de las antiguas civilizaciones del Nuevo Mundo, aunque no llegaron a ser comprendidas.

Durante el siglo XVII hubieron cambios notables una vez pasada la etapa de la conquista y tranquilizado el territorio por la fuerza. Hubo quienes intentaron rescatar el patrimonio y la cultura perdida, intentando revalorizar las antigüedades prehispánicas de forma intelectual, mediante la colección de objetos. Estos años se produjo un renacer de intelectuales criollos bajo un naciente racionalismo. La segunda mitad del siglo XVII representa en la nueva España una época de cambio en la política y economía internacional (*ibíd.*:20). En este periodo y hasta la primera mitad del siglo XVIII se registraron, por parte de conquistadores y viajeros, numerosas descripciones y narraciones de los lugares, monumentos y objetos de los indígenas, pero sin mostrar interés arqueológico o histórico por el pasado.

Con la coronación de Carlos III de Borbón en 1759 comienza una etapa investigadora, a favor del estudio de las antigüedades y la difusión del pensamiento ilustrado. De este periodo destacan las primeras expediciones oficiales a las ruinas de Palenque. La primera de ellas es encargada en 1784 a José Calderón, quien viaja al sitio y remite un informe descriptivo que acompaña con unos dibujos muy rudimentarios, atribuyendo las ruinas a los romanos. Intrigado por tal información, el gobernador de Guatemala, José de Estachería envía al año siguiente al arquitecto real Antonio Bernasconi y le encomienda investigar sobre la edad del centro, la extensión, la población y el origen de las construcciones. El informe fue remitido a Carlos III, quien ordenó una exploración más profunda para resolver algunas cuestiones específicas sobre los materiales empleados en la construcción, datos que revelaban el interés por conocer el proceso de desarrollo cultural alcanzado por los indígenas. La tercera expedición a Palenque se encomendó a Antonio del Río en 1787, acompañado del artista Ricardo Almendariz, quien realizó los dibujos más conseguidos del siglo XVIII, que fueron publicados en 1822 bajo el título *Description of the Ruins of an Ancient City* (Hammond 1988:54)(Fig. 2.1).

<sup>1</sup> Término que hace referencia al desvanecimiento gradual de las grandes ciudades estado del periodo Clásico, y al abandono y migración de sus pobladores entre los años 750 y 1050 n.e (Quintanilla y Demarest 2008).

<sup>2</sup> La conquista española acabó con el legado histórico indígena pero ellos consiguieron conservar parte de su cultura, y aunque sólo sea la sombra de lo que fue, ha conseguido sobrevivir hasta nuestros días. Véase Schávelzon, D. 1990, pp. 15-22.



Fig.2.1 Dibujo del relieve de estuco del Palacio de Palenque, realizado por Ricardo Almendáriz en su viaje junto a Antonio del Río, en 1787. Fuente: Library of Congress. Fig. 2.2 Grabado de esculturas precolombinas realizado por José Castañeda, acompañante de Guillermo Dupaix y publicado bajo el título *Colección general de láminas de los antiguos monumentos de Nueva España* en 1820. Fuente: Fondo antiguo de la biblioteca de la Universidad de Sevilla.

La última expedición realizada en periodo colonial se produce bajo el reinado de Carlos IV de Borbón, quien interesado por las antigüedades del Nuevo Mundo, como su padre, comisionó en 1807 a Guillermo Dupaix, acompañado del artista José Castañeda. Ambos tomaron notas y dibujaron con sumo detalle todo lo que veían (aunque faltos de realismo y con un toque de imaginación)(Fig.2.2), concluyendo que el arte de Palenque era original y no tenía orígenes europeos. El último informe fue publicado entre 1829 y 1831 con el nombre *Antiquities of Mexico*, llegando a alcanzar gran repercusión mundial.

La divulgación del informe de Del Río y Armendáriz se cuela en las sociedades científicas y letradas de Londres y Estados Unidos y se amplía el público en general al traducirse a varios idiomas. A partir de la década de 1830 se inicia la época de los estudios mayas profesionales del siglo XIX. Para este periodo cabe destacar la importancia de varias sociedades científicas que impulsaron estos estudios mediante la difusión y publicación de trabajos: La *American Antiquarian Society*, Massachusetts, fundada en 1812; el *Lyceum of natural History of New York*, establecido en 1817; la *Royal Geographic Society* de Londres, fundada en 1830, y la *Société de Géographie* de París, creada en 1821 (Dávila 2007).

## 2.3 Siglo XIX

En los primeros años del siglo XIX se producen sucesivas luchas por la independencia en América latina<sup>3</sup>, lo que causó un parón en el desarrollo de proyectos culturales, tanto españoles como criollos. En 1825 se introducen algunas leyes para evitar el saqueo y el expolio que estaban sufriendo las ruinas y que se estaba multiplicando a pasos agigantados. En 1827 se establece el Artículo 41. De la Ley de arancel de aduanas marítimas y fronterizas, prohibiéndose la exportación de piezas arqueológicas (Schávelzon 1990:34).

Esta primera mitad del siglo se caracteriza por los estudios de diversos viajeros extranjeros que recorren el área publicando y difundiendo al exterior el patrimonio prehispánico, comenzando con la integración de América latina al mundo occidental. De estos exploradores individuales cabe destacar la figura de Juan Galindo, natural de Dublin, que llegó a ser gobernador de Petén. Galindo exploró y dio a conocer las ruinas de Topoxté y otras islas del lago Yaxha, en Petén; visitó Palenque y las ruinas de Copán y escribió sobre ello con una visión moderna sobre los sitios y sus posibilidades funcionales y económicas. De carácter nacionalista, siempre destacó la importancia que tenía el patrimonio prehispánico para Guatemala. Las investigaciones de Galindo en forma de notas, dibujos y planos, suscitaron el interés de otros viajeros que trabajaron individualmente y bajo el apoyo de instituciones, museos o universidades. Se había abierto el camino y dado a conocer el amplio patrimonio prehispánico.

Los viajeros Francisco Corroy y Jean Frederic de Waldeck, investigaron varios sitios del área, entre ellos Palenque, en las primeras décadas del siglo XIX; mostrando un interés científico por la cultura maya, su idioma y el origen de los habitantes, aunque todavía con un cariz de romanticismo (Fig.2.3). Pero a pesar de las sucesivas expediciones y publicaciones del sitio, el redescubrimiento de las ruinas de Palenque se atribuye a John Lloyd Stephens y Frederick Catherwood, que entre 1839 y 1842 recorrieron varios sitios de Yucatán, realizando estudios minuciosos, acompañados con ilustraciones muy realistas y detalladas, donde se ponía de manifiesto la majestuosidad y el nivel cultural de los mayas; a la vez que mostraron gran preocupación por el grado de abandono y deterioro que mostraban estas construcciones (Fig.2.4). Sus obras *Incidents in travel in Central America, Chiapas and Yucatán* publicada en 1841 y *Incidents in travel in Yucatán*, publicado en 1843 tuvieron un éxito sin precedentes.

<sup>3</sup> El sábado 15 de septiembre de 1821 se firmó la independencia de las provincias centroamericanas de la monarquía española, proceso que llevó 10 años de conflictos. Las causas entre otras: la influencia de ideas revolucionarias de la Ilustración europea, la independencia de los Estados Unidos de América y el abandono por parte de España en Centroamérica debido a sus cambios socio-políticos derivados de la invasión francesa. La independencia de México se hace efectiva días más tarde, el 27 de septiembre de 1821.

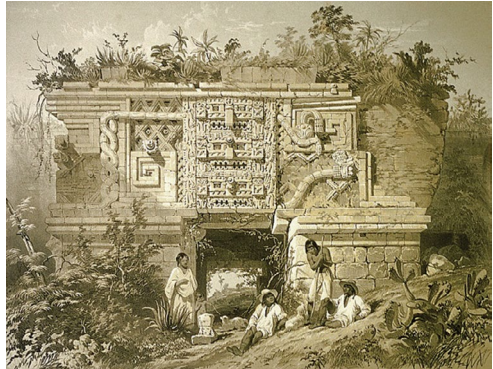
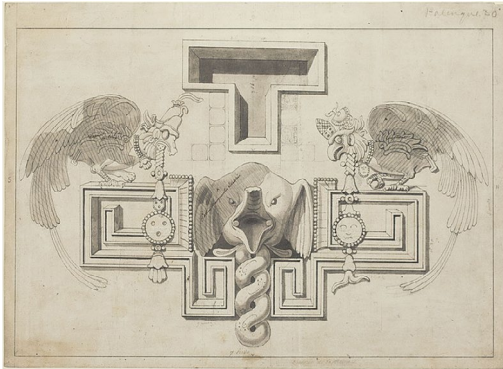


Fig. 2.3 Dibujo de un relieve de Palenque realizado por F. de Waldeck donde se representa una imaginaria cabeza de elefante. Fuente: <https://www.amdigital.co.uk>. Fig. 2.4 Dibujo realizado por Frederick Catherwood de parte de la fachada del cuadrángulo de las monjas en Uxmal, Yucatán. Aunque son coetáneos, los dibujos de éste son superiores en calidad y realismo, pudiéndose apreciar detalles con precisión y exactitud casi fotográfica. Fuente: <https://www.reed.edu/uxmal/galleries/thumbnails/drawings/Drawings-Catherwood-1.htm>.

En 1875, México da un paso adelante con el nombramiento de un Inspector de Monumentos de la República, Leopoldo Batres. Por su parte, la burguesía en Guatemala intenta tener una institución encargada de las antigüedades; en 1851 se había expedido orden para que todo objeto arqueológico que hubiera en la región se entregara en el Ministerio de Gobierno. En 1876 se crea el Museo Nacional, que contaba con un departamento etnográfico y una amplia biblioteca, y aunque este museo fue desmantelado posteriormente en 1881, se volvió a constituir en 1898, permaneciendo hasta día de hoy como el Museo Nacional del país.

Batres inició diversos proyectos oficiales de restauración en edificios arqueológicos de Teotihuacán, Mitla o Xochicalco (México) entre 1887 y 1910, y aunque a día de hoy sus trabajos puedan resultar desmedidos y agresivos, se trataba de las primeras intervenciones realizadas sin precedentes en el continente, ni bibliografía al respecto.

Hacia final del siglo XIX proliferan los proyectos de conservación e investigación de sitios arqueológicos en busca de información precisa, empleando una metodología científica; a la par que se incrementan las leyes patrimoniales en protección de las ruinas. En 1896 se instaura un decreto de ley por el que sólo se pueden realizar excavaciones en territorio mexicano con la autorización del poder ejecutivo, bajo la supervisión de un delegado especial, siendo todo el material arqueológico extraído propiedad del Gobierno. Además, la destrucción o deterioro de los monumentos constituye un delito, por lo que cada sitio arqueológico debe contar con su vigilante (*ibíd.*:49).



Tres nombres que destacan de este final de siglo son Alfred Maudslay, quien exploró diversos sitios del área maya, entre ellos Tikal, Palenque, Chichen Itzá, Quiriguá o Yaxchilán, estudiando las ruinas con suma minuciosidad y constituyendo un pilar importante para los estudios del entrante siglo XX. Teobert Maler fue un entusiasta de las antigüedades prehispánicas, defendiendo con gran energía el patrimonio de México y condenando su saqueo y abandono. Trabajó en varios centros importantes de la cuenca del Usumacinta, y en Chichén Itzá (Fig. 2.5), donde sus trabajos de conservación, limpieza y liberación de edificios fueron pioneros (*ibid.*:52). Por último William Holmes, quien después de su segundo viaje a México en 1895, publicó *Archaeological studies among the ancient cities of Mexico*, obra referente para todos los estudios arqueológicos y de restauración del siglo XX, gracias a su dominio del dibujo, sus conocimientos de arquitectura y a su empleo precursor del método estratigráfico.



Fig. 2.5 Fotografía tomada por Teobert Maler en 1892 de El Castillo, Chichen Itzá, Yucatán. Fuente: *Collection of Negatives and Prints, 1895-1908*: Peabody Museum Archives, Harvard University.

## 2.4 Siglo XX

El cambio de siglo comienza con el estallido de la revolución mexicana en 1910, lo que produjo numerosos cambios políticos, económicos y sociales en el panorama cultural. A pesar de ello, la arqueología estaba comenzando a tener un rumbo diferente, empezando a ser más metódica (desde 1910 se institucionaliza el método estratigráfico) y de mayor calidad. La restauración de las ruinas prehispánicas se convertirá en una labor habitual y también la publicación y difusión de los trabajos (*ibíd.*:76).

Dos hechos contribuyen al avance de los proyectos arqueológicos y de restauración en México; la salida de Leopoldo Batres como Inspector de Monumentos, y el nombramiento de Manuel Gamio en su lugar en 1913. Por otra parte, la fundación de la Escuela Internacional de Arqueología y Etnografía Americana en 1911 y el nombramiento de su primer director Franz Boas. Ambos trabajarán juntos, en pos de la investigación arqueológica científica y la búsqueda de los orígenes mexicanos, desarrollando un marco legal al amparo del patrimonio. En 1914, Gamio establece la *Ley Patrimonial de 1914*, así como el *Reglamento para la investigación y restauración*. En 1916 aprueba la *Ley de Conservación de Monumentos Históricos* y en 1923 El proyecto de *Ley para la Conservación Arqueológica en México*; leyes que se van completando y sucediendo, sirviendo de ejemplo para los países vecinos (*ibíd.*:78).

Por su parte Guatemala, comenzó con su primera restauración en 1910, en Quiriguá que fue financiada por una empresa privada, la United Fruit Company y llevada a cabo por Edgar Hewett, Sylvanus Morley y Earl Morris. Entre las labores realizadas se limpió de vegetación, se mapeó el sitio y registró fotográficamente, se extrajeron moldes de relieves y monumentos y se restauró el edificio I, tras su excavación entre 1911 y 1912. En Tikal (descubierto en 1848), trabajaron Raymon Merwin y Alfred Tozzer en estos años, realizando estratigrafías y el primer plano por triangulación (*ibíd.*:79).

A partir de 1920, y con la creciente ola de trabajos arqueológicos y de restauración, se incrementa el flujo turístico en el área, viéndose rápidamente multiplicadas las empresas hoteleras y de transporte. La Carnegie Institution of Washington comienza a trabajar en el área a partir de 1923, desarrollando trabajos de arqueología y restauración en Chichen Itzá (1924-26), Uaxactún (1923-1937) y Copán (1935-1941). A raíz de los trabajos de la Carnegie, las misiones de otros países extranjeros se acrecientan, llevándose a cabo nuevos proyectos. A partir de 1930, en México, la arqueología y la restauración cada vez se verán más atadas en torno a una organización: el Instituto Nacional de Antropología e Historia, surgido en 1939, que dictará el *modus operandi* de las intervenciones, a pesar de las recomendaciones internacionales recogidas en la Carta de Atenas de 1931, que pasó en un principio desapercibida. En 1931 (y hasta 1949), comienzan los titánicos trabajos de restauración en Monte Albán, a cargo del arqueólogo nacional Alfonso Caso, donde se llevaron a cabo reconstrucciones exageradas, hipotéticas y sin fundamento, con el cemento como material protagonista, dejando de manifiesto el inicio de una nueva corriente reconstructora. Tula, intervenida entre 1940 y 1958 y Mitla intervenida entre 1939 y 1951 son otros dos de los muchos escenarios de reconstrucciones inverosímiles, que basadas en la "hipótesis", cambiaron la estética y significado de los edificios.

En Guatemala los trabajos más importantes tuvieron lugar en Piedras Negras, aunque no se tomaron medidas de conservación; y en Tikal, que fue intervenido entre 1956 y 1966 y que representa la última experiencia de la tradición constructora al servicio del turismo. La magnitud de los trabajos desarrollados en Tikal a cargo de la Universidad de Pennsylvania, el IDAEH y el FYDEP de Guatemala fueron descomunales. Se desarrollaron grandes obras de infraestructura, como la construcción de un aeropuerto cercano, de una aguada y de dos carreteras: una desde Flores y otra desde la capital hasta las ruinas, abriendo así Petén a la economía nacional (*ibíd.*:162).

A principios de los años 60, los aires de cambio eran patentes. Las nuevas generaciones se cuestionaban los métodos empleados durante esta corriente reestructuradora. La fundación de la Escuela de Conservación, Restauración y Museografía Manuel Castillo Negrete, basada en las tendencias europeas, con la participación de especialistas con una visión muy diferente a lo tradicional, así como la llegada a México de la Carta Internacional de Venecia en 1964, impulsaron y reforzaron esta nueva corriente de jóvenes conscientes del daño que se estaba causando en el patrimonio y de la necesidad de un cambio. Pero durante esta década, los trabajos de restauración empleando la reconstrucción con cemento y hormigón armado siguieron adelante, y no fue hasta 1972, con la publicación de las Recomendaciones sobre la Protección del Patrimonio Cultural y Natural por parte de la UNESCO, cuando se produjo el verdadero cambio. En los años siguientes surgió numerosa literatura al respecto, como el Boletín del Centro de Investigaciones Históricas y Estéticas de la Universidad de Venezuela (1973), con un capítulo dedicado a la conservación; o *La restauración arquitectónica de edificios* de Augusto Molina, bajo las nuevas tendencias. En 1974, el INAH organiza la 1ª Reunión Técnica Consultiva sobre conservación en monumentos y zonas arqueológicas, en la que se enfrentaron las dos corrientes del momento, y aunque los resultados redactados especificaban una serie de normas siguiendo las últimas Recomendaciones Internacionales, todavía quedaban muchos detractores.

Entre 1973 y 1978 se realizan las primeras intervenciones basadas en el nuevo planteamiento teórico, donde las reconstrucciones no tenían cabida. Yaxchilán (Chiapas) y el Juego de Pelota de Uxmal (Yucatán), son dos ejemplos del cambio en la teoría de la conservación en el área maya. En ambos trabajos primó la salvaguardia del sitio, realizándose tareas de desescombro, limpieza de vegetación y consolidación de las partes existentes, restituyendo únicamente los elementos esenciales como dinteles o cornisas, y publicando un informe detallado de los trabajos. Se sentó el precedente a las futuras intervenciones y se marcó el camino a seguir hacia la conservación y restauración actual en el área maya.

## 2.5 Guatemala. Antecedentes y estado legislativo actual

Las leyes que hoy rigen la conservación del patrimonio arqueológico maya son el resultado de la evolución humana y su contexto político-social, colmado de continuos avances y retrocesos, que han ido conformando el marco legislativo actual en aras de proteger y poner en valor este patrimonio.

En Guatemala, hubo que esperar hasta 1893 para que se promulgase un decreto específico sobre conservación del patrimonio en el que el estado asumía algunas responsabilidades por primera vez. Un año después, en 1894 se publica el Decreto 479, abriendo el campo hacia la protección de todos los "...monumentos arqueológicos e históricos...". Ambos decretos pueden considerarse los primeros antecedentes formales en cuestión de ley de protección del patrimonio. A partir de este año, se suceden distintas leyes para su protección, siendo las principales:

- 1905. Se publica un *Decreto de Conservación de monumentos arqueológicos*, en el que se manifiesta el daño producido en el patrimonio por los trabajos agrícolas y los prohíbe en zonas con evidencias arqueológicas.
- 1922. Se publica el *Decreto 791* mediante el cual se funda el Museo de Arqueología y Etnología y la Dirección General de Antropología, Etnología e Historia, que desde entonces será la responsable de la exploración, conservación, protección e inspección de ruinas, monumentos y sitios históricos y arqueológicos.
- 1925. Se emite el *Decreto nº 1376 Ley de arqueología y Museos* en el que se concreta que "...todos los monumentos y objetos arqueológicos, etnológicos, históricos y de arte antiguo, contenidos dentro del territorio de la República, son propiedad exclusiva de la Nación, y que no podrán ser enajenados a excepción de los objetos duplicados menores, producto de las exploraciones, los cuales pasarían a pertenecer a los exploradores...".
- 1935. Mediante el *Decreto nº 1623* se crea el definitivo Museo Nacional al que se anexa el Museo de Arqueología.
- 1945. Se promulga la segunda Constitución de La República en cuyo texto resalta el artículo 86, destinado a la protección del Patrimonio Cultural: "...*Toda la riqueza artística, histórica y religiosa del país, sea quien fuere su dueño, es parte del tesoro cultural de la Nación y está bajo la salvaguardia y protección del Estado. Se prohíbe su exportación y podrá impedirse su enajenación o transformación cuando así lo exigiere el interés patrio. El Estado organizará un registro de la riqueza artística, histórica y religiosa, asegurará su custodia y atenderá a su perfecta conservación. El Estado debe proteger, también, los lugares y monumentos notables por su belleza natural o reconocido valor artístico o histórico...*" (Art. 86 CG).
- 1947. Se publica el *Decreto nº 425 Ley Sobre la Protección y Conservación de los Monumentos, Objetos Arqueológicos, Históricos, Típicos y Artísticos* (en vigor), donde se establece que "...*todos los monumentos, objetos arqueológicos, históricos y artísticos del país, existentes en el territorio de la República, sea quien fuere su dueño, se consideraran parte del tesoro cultural de la Nación*

*y están bajo la salvaguardia y protección del Estado...".* Asimismo se instaura un Registro de la Propiedad Arqueológica, histórica y artística, dependiente del Instituto de Antropología e Historia (IDAEH), como encargado de la inscripción, cancelación y publicidad de los actos y contratos relativos a los derechos que afecten a los monumentos, objetos arqueológicos, históricos y artísticos, debiendo inscribirse tanto los bienes particulares como los bienes propiedad del Estado. Dentro de sus disposiciones se establece la responsabilidad de los particulares de la guarda y conservación de los objetos que se encontraran en su poder (Méndez 2007:20-21).

- 1970. Se estipula el Acuerdo Ministerial nº 1210, *Declaración de Zonas y Monumentos Arqueológicos, Históricos y Artísticos de los Periodos Prehispánicos e Hispánico*. Por la que se otorga categoría de Patrimonio Cultural a una serie de sitios arqueológicos, declarando que *"...es de interés nacional conservar todos los ejemplos que muestren la evolución de la arquitectura desde los periodos más antiguos del Horizonte Preclásico hasta nuestra Independencia, y evitar su transformación y destrucción..."* (UNESCO 1970).
- 1985. Se proclama el texto de la actual Constitución política (en vigor), destacando en la *sección II: Cultura*, los artículos 60 y 61 sobre la protección del patrimonio: Art.: 60. Patrimonio Cultural: *"...Forman el patrimonio cultural de la Nación los bienes y valores paleontológicos, arqueológicos, históricos y artísticos del país y están bajo la protección del Estado. Se prohíbe su enajenación, exportación o alteración salvo los casos que determine la ley..."*. Art.: 61. Protección al patrimonio cultural: *"...Los sitios arqueológicos, conjuntos monumentales y el Centro Cultural de Guatemala, recibirán atención especial del Estado, con el propósito de preservar sus características y resguardar su valor histórico y bienes culturales. Estarán sometidos a régimen especial de conservación el Parque Nacional Tikal, el Parque Arqueológico de Quiriguá y la ciudad de Antigua Guatemala, por haber sido declarados Patrimonio Mundial, así como aquéllos que adquiera n similar reconocimiento..."* (CPG 1985).
- 1997. Se publica el *Decreto 26-97 Ley para la protección del patrimonio cultural de la nación* (modificado en 2007 y en vigor), donde se legitima la propiedad pública y privada de los Bienes, pero ambos bajo responsabilidad del estado: *"...aquellos bienes culturales de propiedad pública o privada existentes en el territorio nacional, sea quien fuere su propietario o poseedor, forman parte, por ministerio de la Ley de Patrimonio Cultural de la Nación, y estarán bajo salvaguarda y protección del Estado..."* (CRG 1997; Matarredona 2015:199).
- 2007. El Ministerio de Cultura y Deporte aprueba el *Reglamento para desarrollar trabajos de investigaciones arqueológicas y disciplinas afines* (modificado en 2012 y en vigor), regularizando los métodos para desarrollar proyectos de investigación arqueológica y estipulando los requisitos del equipo investigador en un total de 54 artículos sumamente especificados (MCD 2012; Matarredona 2015: 199).
- 2007: Acuerdo Gubernativo 282-2007. Cobro por ingreso a sitios/ parques arqueológicos y Museos en Guatemala. Se emite este acuerdo que autoriza al Ministerio de Cultura y Deportes a gestionar el cobro por ingreso a los 26 sitios/ parques y museos del país que cuentan con vigilancia, con la finalidad de obtener fondos económicos para su administración y conservación (Ponciano 2015:1059).

Actualmente, el Ministerio de Cultura y Deportes de Guatemala mantiene vigilancia en al menos 100 sitios arqueológicos de los que 29 poseen la categoría de parque al contar con la infraestructura necesaria para atender al turismo. Dentro de esta categoría, se distinguen dos sitios declarados Patrimonio Cultural de la Humanidad por la Unesco; el Parque Nacional de Tikal y el Parque Arqueológico de Quiriguá (Crasborn 2012: 42).

El Sistema guatemalteco de protección de sitios y parques arqueológicos se inició a raíz de la creación del Departamento de Monumentos Prehispánicos y Coloniales del IDAEH en 1976 con el objetivo de proteger y conservar los vestigios del país.

Como antecedentes, recordamos las primeras acciones llevadas a cabo para la protección de las ruinas que tuvieron lugar en Quiriguá, Izabal, en 1921; en Uaxactún, Petén, en 1932 y en Zaculeu, Huehuetenango en 1940. Con la creación del Instituto de Antropología e Historia (IDAEH) en 1946 como organismo encargado de la protección del patrimonio del país, aumenta el número de acciones para la tutela de estos bienes, sumándose cada vez más nombres a la lista de sitios y parques arqueológicos protegidos. Los primeros de los que se hicieron cargo son el Parque Nacional de Tikal en 1955, y Kaminaljuyú en 1957. En la década de los 70 se fundan Operación Rescate (Museo de Arqueología) y Asociación Tikal como impulso para frenar la alarmante situación de expolio de piezas arqueológicas que estaba sufriendo el departamento de Petén, creando puestos de vigilancia permanente en zonas como Yaxhá y Topoxté, Nakum y Zaculeu.

A principios de los años 80 se intensifica la vigilancia arqueológica, estableciéndose puestos en lugares muy inaccesibles como El Mirador, Kinal y Río Azul. En 1985, se implementa un programa para determinar áreas de reserva en el municipio de Sayaxché, para la protección de sus principales sitios arqueológicos: el Parque de Dos Pilas, el parque de Aguateca y el Parque de Ceibal. Entre 1987 y 1988 se incorporan al sistema de vigilancia los sitios de Machaquila, Sacul, Buenos Aires, Motul de San José o El Zotz. En 1989, se incorporan Ixcun, en Dolores y La Blanca, en Melchor de Mencos. En 1990 se crean puestos de vigilancia en Peru-Waka, en San Andrés, Cuevas de Naj Tunich, en Poptún, Nakbé y Tintal en Flores.

En 1993 se incorpora Piedras Negras después de los trabajos del Proyecto Piedras Negras a cargo del Dr. Stephen Houston y el Dr. Héctor Escobedo. En 1998 se incorporan San Miguel Tayazal, en el área central de Flores y La Florida, y en 1999 el sitio Altar de Sacrificios y Cancuén.

En el año 2000, se incorporan por una parte los sitios Ucanal y Laguna Perdida y por otra, Xultun, y San Bartolo a raíz de los trabajos del proyecto Arqueológico San Bartolo dirigido por William Saturno. Asimismo en 2002, se incorpora al sistema de vigilancia arqueológica el sitio San Clemente tras los trabajos del Proyecto Triángulo, a cargo del Arquitecto Óscar Quintana, iniciados en 1995, y Sayaxché, tras el abandono del destacamento militar que ocupó el área desde los años 80. En 2004, se incorporan los sitios Zapote Bobal, la Corona y Cuevas de Candelaria. En 2007, debido a los trabajos de investigación arqueológica de la Misión Franco Guatemalteca, dirigidos por Phillipe Nondedeo, el sitio Naachtun, en Flores, también es incorporado al sistema de vigilancia. Los últimos sitios en ser introducidos fueron Popol y El Pato, en La Libertad y Xulnal en San Andrés; los dos primeros a raíz de la coordinación del IDAEH con Fondo de Tierra y en el caso de Xulnal, a raíz de los trabajos realizados por el Proyecto Cuenca Mirador (Ponciano 2015: 1053-1064).







# CAPÍTULO 3

## LOS ESTUCOS MAYAS

### 3.1 Breve introducción a la arquitectura maya

La diversidad de periodos históricos en que se desarrollaron los grupos mayas, así como la influencia de otras culturas y la pluralidad de áreas geográficas donde habitaron, resultaron en una complejidad de estilos arquitectónicos en los que primaron los espacios abiertos y la monumentalidad de las construcciones. La evolución de los sistemas constructivos se desarrolla paralelamente a los periodos cronológicos en los que se ha clasificado la historia de esta cultura. Si bien durante el periodo arcaico (Fig. 3.2) se hallan los primeros asentamientos, sobre todo a lo largo de la costa del pacífico<sup>1</sup>; no es hasta el periodo Preclásico (1500-250 a.n.e) que comienza el surgimiento de las grandes urbes. Durante el Preclásico Temprano se establecen los primeros grupos de habla maya con asentamientos permanentes y un sistema de jerarquías y linajes, siendo en el Preclásico Medio (900-300 a.n.e) cuando comienzan a levantarse las primeras edificaciones de carácter público (Nakbé, en Petén o Kaminaljuyú en Ciudad de Guatemala) (Muñoz 2006).

En el Preclásico Tardío (300 a.n.e-250 n.e), se edifican enormes plataformas piramidales con grandes mascarones modelados en estuco, en los que se representan elementos zoomorfos, fitomorfos y geométricos que se asocian al Sol, a Venus y a la Tierra. También se representan momentos triunfales de los gobernantes y sus hazañas, dada la aceptación de la autoridad real de forma generalizada en todo el área maya (Muñoz 2006). Destacan los complejos de Cerros, Lamanai y Cuello en Belice; así como El Mirador, Tikal, Uaxactún y algunas construcciones de Nakbé, en Guatemala (Valverde 2004)(Fig. 3.1).



Fig.3.1 Tikal. Vista de los templos I, II y V desde el Templo IV.

<sup>1</sup> *Los asentamientos de Cuello, en Belice (1200 a.n.e), (Hammond 1991) y Cahal Pech, Belice (950 a.n.e), (Muñoz 2006), son las evidencias más tempranas de ocupaciones primitivas.*



Fig.3.2 Eje cronológico de los periodos de la cultura maya. Basado en Muñoz 2006a.

Durante el periodo Clásico (250-1000 n.e), la cultura maya alcanza su máximo esplendor, notándose ya en el primer periodo (Clásico Temprano, 250-600 n.e) un aumento de las grandes ciudades, entre ellas Tikal. El Clásico Tardío (600-850 n.e) supuso la eclosión de la cultura maya, especialmente en las Tierras Bajas del Sur. El aumento de la población propició la fundación de muchas otras ciudades, con gran incremento de obras edilicias y obras artísticas, entre las que destacan Tikal, Palenque, Yachxilán, Piedras Negras, Dos Pilas, Nakum, Yax-Há, Copán, Quiriguá o Calakmul, en esta zona geográfica (Muñoz 2006:28)(Fig.3.3). El Clásico Terminal (850-1000 n.e), se caracteriza por el abandono progresivo de estas grandes ciudades a consecuencia de la inestabilidad política y social (Guerras y presión demográfica principalmente), que se extenderá al periodo Postclásico (1000-1500 n.e).



Fig. 3.3 Nakum. Templo E cuya primera construcción data del periodo Clásico Tardío (600-850 n.e)(Aquino *et. al* 2010).

Aunque este periodo supone el colapso de la civilización maya, el declive fue lento y no simultáneo en todas las regiones, estableciéndose algunos asentamientos en zonas lacustres como Tayasal o Topoxté en las Tierras Bajas, u otros centros importantes como Iximché o Zaculeu en las Tierras Altas de Guatemala (Muñoz 2006).

Las poblaciones se asientan en grandes extensiones de terreno urbanizado, enclavadas en el entorno natural. Las ciudades se planean y construyen en torno a un centro vital en el que reside y gobierna la clase elitista, generalmente en edificios de carácter político-administrativo llamados Palacios. Este centro neurálgico es también el lugar donde se erigen otras construcciones significativas de carácter religioso o ceremonial como son los templos, edificios astronómicos o juegos de pelota. En la periferia de la ciudad se asentaba la clase obrera, en pequeñas casas de planta ovalada, construidas con materiales perecederos sobre una pequeña plataforma de tierra y cal.

Las ciudades se comunicaban mediante calzadas, conocidas con el nombre maya de *sacbé* (camino blanco), elevadas del suelo mediante piedra caliza y niveladas con tierra blanca (*Sascab*) compactada. Algunas de ellas llegaron a tener una anchura de hasta 70m, como se ha localizado en Tikal, y una longitud de hasta 100m, como la calzada que une Cobá con Yaxuná, en Yucatán (Muñoz 2006:44).

El material por excelencia empleado en las construcciones mayas es la piedra caliza que extrajeron de canteras mediante herramientas líticas de gran precisión. La piedra se empleó tanto para la labra de sillares como para mampuestos, material de relleno y carga de morteros, y también como superficie para esculpir monolitos como las estelas o los altares. Los muros constructivos<sup>2</sup> que conforman el espacio interior de los edificios están compuestos por un relleno de mampostería y mortero de cal, contenido por ambas caras con un muro de sillares revestido de estuco. Estos gruesos muros, soportan el peso de las bóvedas que cierran las estancias. La solución más representativa de la arquitectura maya es la falsa bóveda, o bóveda de aproximación, formada por dos voladizos simétricos que se cierran en una clave (llamada tapa de bóveda). Las dovelas se colocan en voladizo sobre las anteriores, contrapesados por la carga de la mampostería. De este modo se consiguen dos lados independientes estructuralmente, permitiendo la conservación de un lado, si el otro colapsa (Muñoz 2006). La apertura de grandes vanos de acceso a las estancias a través de estos gruesos muros fue posible gracias a los dinteles, realizados en piedra caliza, o madera de gran dureza, generalmente con glifos tallados donde se narran hechos conmemorativos del sitio y su gobernante.

Las fachadas de los edificios guardan siempre la simetría de elementos y el ritmo compositivo; así mismo, se tallaron enormes relieves revestidos en estuco, que adornaron basamentos, frisos o cresterías, y se estucaron las fachadas con finas pastas de cal pintadas con colores brillantes, de entre los que predomina el rojo, complementándose así con el intenso color verde de la selva.

A demás de la función primordial de protección, la arquitectura maya refleja una concepción del universo y la vida, convirtiendo en arquitectura los elementos naturales que consideraban sagrados y en relación a sus mitos cosmológicos (Muñoz 2006). La ciudad estaba en relación tanto con los ciclos temporales como con el ascenso al poder de cada nuevo gobernante (Valverde 2004:4), con lo que se concibe como un ente vivo con carácter de continuidad, donde las formas del pasado y presente conviven. Es por ello que en cada remodelación de la ciudad, los nuevos edificios se construían sobre los existentes que les servían de base. El edificio anterior era anulado y clausurado, rellenándose todas sus estancias mediante una argamasa de piedras, tierra y cal, y construyéndose encima el nuevo edificio.

<sup>2</sup> Existen diferentes tipologías de muros constructivos empleados para las construcciones mayas, como los muros de tierra o de ladrillo en Comalcalco (Muñoz 2006:72), en el estado mexicano de Tabasco.

## 3.2 El papel del estuco en las construcciones mayas

### 3.2.1 El revoco de cal en las construcciones populares

Al pensar en arquitectura maya, inmediatamente se visualizan los edificios y templos monumentales, contruidos a base de enormes sillares tallados, fruto del tiempo y del esfuerzo de mucha mano de obra. Sin embargo en los comienzos de esta cultura, la arquitectura, que inicia con una función de cobijo frente a las duras condiciones ambientales del clima tropical, es práctica y liviana, realizada con materiales perecederos proporcionados fácilmente por el entorno.

Así pues los pobladores más antiguos (Fase Swasey 1200-900 a.n.e), construían sus viviendas con madera y paja sobre el suelo de tierra. Posteriormente, las paredes pasaron a construirse de bajareque<sup>3</sup>, dispuestas en un suelo de encalado con piedra machacada. Más tarde, las casas empezaron a disponerse en torno a un patio totalmente encalado y a asentarse sobre una plataforma baja de planta absidal, compuesta de piedras y tierra que se encalaba superficialmente. Estas plataformas individuales se fueron ampliando y uniendo paulatinamente, dando lugar a un basamento de gran extensión (Fase Bladen 900-650 a.n.e) (Hammond 2000:36).

Por lo general estas casas eran de planta absidal o rectangular, con paredes realizadas con estacas que se afianzaban en la base o plataforma elevada. Estas paredes de estacas y ramas entretrejidas eran recubiertas con mortero de cal, y normalmente no presentaban ventanas; aunque se han hallado ejemplos de casas con ventanas<sup>4</sup> derivadas de no cubrir con mortero un área rectangular de la pared, resultando en una ventana enrejada por las varas de madera (Valverde 2004:7). Los techos eran de palma muy altos para evacuar rápidamente el agua de lluvia. Presentan generalmente una puerta delante y otra trasera; y el interior se divide en dos espacios mediante un muro longitudinal con un acceso en medio.

El empleo de las pastas de cal en la vivienda maya tiene un carácter meramente funcional, conglomerando las cañas entretrejidas y formando una sólida pared con cualidades aislantes y antisépticas gracias a las propiedades desinfectantes de la cal. La función estética todavía no está presente pues estos revocos son toscos, se aplican en gruesas capas y no se aplanan ni se decora la superficie. Éstas fueron las viviendas de la clase obrera que se asentó a las afuera de las grandes ciudades de la élite para la cual trabajaron. Esta vivienda tradicional se ha mantenido sin apenas cambios, y actualmente son las casas vernáculas que pueden hallarse fácilmente en zonas como la península de Yucatán (Muñoz 2006:49)(Fig. 3.4). A partir de la vivienda general, los mayas construyeron las casas de la nobleza, trasladando este concepto al material pétreo.

<sup>3</sup> Sistema de construcción mediante cañas o palos entretrejidos y revocados.

<sup>4</sup> En el sitio de Joyas de Cerén, El Salvador, que fue cubierto por cenizas de la erupción del volcán Ilopango, se conservaron restos de casas de material perecedero con ventanas rectangulares resultado de no cubrir con mortero dichas zonas (Valverde 2004:7).



Fig. 3.4 Casas vernáculas actuales, realizadas con la tradicional cubierta de palma y construcción de madera o bajareque (derecha) en Oaxactún.

### 3.2.2 El estuco en la arquitectura monumental

A diferencia del papel desempeñado en la construcción de la vivienda tradicional, el estuco<sup>5</sup> fue el material por excelencia empleado por los antiguos mayas para el revestimiento, tanto interior como exterior de sus grandes edificaciones, proporcionando un acabado estético y ofreciendo protección frente a las lluvias y a las elevadas temperaturas propias del clima tropical. Así pues este revestimiento continuo, se encuentra íntimamente ligado a la arquitectura, adaptándose a sus formas y extendiéndose en su inmensidad. El estuco no se concibe sin la arquitectura y la arquitectura maya no se concibe sin estuco, en primer lugar, porque la conservación de las construcciones en un clima tropical hubiera estado muy limitada, y en segundo lugar porque el estuco junto a la pintura materializaron aquellas historias, hechos o representaciones mitológicas con las que hicieron a los edificios hablar.

La habilidad técnica adquirida en su preparación, la abundancia de componentes calizos como materia prima, y las óptimas propiedades plásticas para recubrir suelos, muros o relieves ornamentales sobre los que aplicar el color, lo convirtieron en un material imprescindible para la construcción de sus ciudades.

Como se apuntó anteriormente, la existencia de arquitectura monumental se identifica ya en el Preclásico medio y tardío (900-250 a.n.e). Para el acabado de las construcciones se emplearon en gran abundancia estas pastas de cal, que se aplicaron tanto para el revestimiento de los edificios, como para modelar grandes relieves decorativos en los exteriores de sus fachadas. En el Preclásico Tardío, la escultura arquitectónica monumental se convierte en el medio para expresar el poder, siendo posible hallar grandes mascarones de hasta cuatro metros de altura en representación de diferentes divinidades, adornando las fachadas de las plataformas (Hansen 2000, Hansen *et.al* 2007), (Hansen *et.al* 1995) (Acuña *et.al* 2010).

<sup>5</sup> "Estuco" ha sido el término generalmente empleado en la arqueología mesoamericana para los materiales de cal que componen las ornamentaciones arquitectónicas, a pesar de que este término tiene otras acepciones en otros contextos académicos. (Villaseñor Y Aimers 2008). A lo largo de este trabajo se empleará este término debido a su uso generalizado.



En mayor medida se han conservado las manifestaciones de épocas posteriores, sobre todo las pertenecientes al periodo Clásico (Fig. 3.5). Un buen ejemplo de ello son los edificios de Balamkú, situado al sur del estado mexicano de Campeche, o Kohunlich, en la región de Rio Bec, Quintana Roo; así como las esculturas y relieves modelados de Ek Balam (Fig. 3.6), en Yucatán. Todos ellos se remontan al Clásico Temprano y conservan importantes relieves decorativos como esculturas exentas, mascarones o glifos, todavía estucados, que suponen una buena muestra del alto nivel técnico que los habitantes de estos lugares alcanzaron en esta materia, en época de esplendor.



Fig. 3.5 Relieves modelados en estuco con representación de cinco personajes, dioses y glifos. Se aprecian huellas cromáticas como el negro, rojo y azul maya. Delante estela 35. Edificio 21, Yaxchilán.

Durante el Postclásico, comprendido entre los años 1000 y 1500 n.e, tiene lugar el declive de la cultura maya, produciéndose en la arquitectura un importante receso formal y espacial, al hacerse uso de fórmulas más torpes y toscas. Este periodo presenta también multitud de fórmulas motivadas tanto por influencias exteriores como por el abandono de algunas prácticas tradicionales de la arquitectura clásica maya (Muñoz 2006).



Fig. 3.6 Detalle de los relieves de estuco en Ek Balam, Yucatán. Fotografía: Carlos Delgado CC-BY-SA; <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.es>

## 3.3 Los materiales constitutivos

### 3.3.1 La cal

La cal se usó de manera abundante en las Tierras Bajas mayas dada la geología propia de la península de Yucatán. Esta plataforma está formada por sedimentos calizos de era Cenozoica (Villaseñor y Aimers 2009; Guash 2016). A pesar de la fácil obtención de la piedra caliza, el empleo de la cal estuvo muy diferenciado según los niveles socioeconómicos de cada sitio maya. Como se describió anteriormente, hay una gran diferencia entre la arquitectura pública monumental para la que se emplearon grandes cantidades de cal, con respecto a la arquitectura doméstica donde prevaleció la arquitectura de tierra con lechada de cal. El uso preferencial de la cal se debe a la alta inversión laboral que este material demanda; lo que causaba que la cal en la arquitectura fuera considerada como material de prestigio (Villaseñor y Aimers 2009:30).

Además de emplearse en el terreno de la construcción, la cal jugó un papel fundamental en la vida y desarrollo de la civilización. Fue clave en la alimentación de la población ya que permitió una mejor asimilación de las propiedades y nutrientes del maíz (producto base de la dieta maya), mediante el proceso de nixtamalización<sup>6</sup> (Schreiner 2002; Barba 2013; Villaseñor y Aimers 2009), además de estar presente en otros ámbitos como en la medicina, la tintorería o el rito funerario (Vázquez de Ágredos y Horcajada 2016: 2), gracias a sus cualidades alcalinas y desinfectantes. También se empleó extensamente en la manufactura de los códices, para reblandecer las fibras del papel en su proceso de elaboración, como imprimación para la escritura, así como junto al tabaco de mascar para incrementar sus efectos alucinógenos (Villaseñor 2010:43).

Los orígenes tecnológicos del empleo de cal en Mesoamérica no están todavía definidos. En el altiplano central su adopción pudo haber sido resultado de una innovación propia o por el intercambio tecnológico con otras culturas. En el área maya, las evidencias arqueológicas más tempranas acerca del uso de la cal en arquitectura, están presentes en los sitios de Cuello, en Belice, fechados entre 1000-600 a.n.e; en Nakbé, Guatemala, entre 900 y 600 A.n.e o Puerto escondido, en Honduras, entre 1000-900 a.n.e (Villaseñor y Barba 2011:90).

La cal es el componente activo que conglomerara los elementos constitutivos del estuco o mortero. Incluye las formas físicas y químicas de óxidos e hidróxidos de calcio y magnesio (Cazalla 2002:21). La cal se obtiene por calcinación de piedra u otros materiales calizos, cuyo compuesto mayoritario es carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ), más o menos acompañados de impurezas de tipo arcilloso. Según la composición química de la piedra de origen, el endurecimiento final de la cal se producirá mediante unos mecanismos u otros (Pocostales 2015:39). Así las cales naturales se distinguen en aéreas e hidráulicas según su composición química, y por ende su reactividad (Domenech y Yusá 2006; Gárate 2000; Pocostales 2015; Cazalla 2002).

<sup>6</sup> *Del náhuatl nixtli cenizas y tamalli masa, el proceso de la nixtamalización se ha mantenido y transmitido de generación en generación hasta la actualidad. Consiste en cocer el maíz en agua con una pequeña proporción de cal, y dejarlo luego en remojo en el agua de cocción de 14 a 18 horas. Este maíz se lava y se muele hasta obtener una masa con las que se preparan las tortillas (Paredes, Guevara y Bello 2009).*



### 3.3.1.1 Tipos de cales

#### *Cales aéreas*

Las cales aéreas se combinan y endurecen por contacto con el  $\text{CO}_2$  del aire. Proceden de piedras calizas compuestas por diferentes proporciones de carbonato cálcico y carbonato de magnesio. Se llama cal cálcica (CL) o “grasa” a aquellas cuya composición es muy pura en óxido o hidróxido de calcio, conteniendo hasta un 5% de óxido o hidróxido de magnesio. Cuando este último porcentaje supera el 5%, la cal se denomina dolomítica (DL) o “magra”. La cal dolomítica se apaga y endurece más lentamente por lo que no es muy considerada en la elaboración de revestimientos (Domenech y Yusá 2006:15).

El producto resultante es el óxido de calcio (cal viva). Al entrar en contacto con partículas de agua, la cal viva se hidrata. En este proceso de hidratación, se produce una fuerte reacción exotérmica y una modificación del Ph del agua de los poros, llegando a un Ph de 12,6. Además, el óxido de calcio se expande, aumentando su volumen en un 90% (Cazalla 2002:23).

El hidróxido de calcio (o cal apagada) completa el ciclo mediante la carbonatación; reacción en la que este compuesto se transforma en carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ), el componente original con el que inició el proceso. La carbonatación supone el endurecimiento lento y progresivo del hidróxido de calcio, que puesto en obra adquirirá consistencia aglomerando a las partículas de árido añadidas para formar el mortero<sup>7</sup>.

#### *Cales hidráulicas*

Estas cales se caracterizan por poseer propiedades hidráulicas, es decir la capacidad de endurecer bajo el agua y no sólo en contacto con el  $\text{CO}_2$  atmosférico. Esta propiedad se debe a la presencia de silicatos y aluminatos de calcio (arcillas) en su composición. Las cales hidráulicas naturales son obtenidas por calcinación de calizas arcillosas o margas con un porcentaje entre 8-27% de impurezas (sílice y alúmina) (Gárate 2000:105).

El proceso cíclico de la cal hidráulica es el mismo que el de la cal aérea, aunque las reacciones químicas que se producen en la calcinación son más complejas. Hasta los  $700^\circ\text{C}$  se descomponen los silicatos de las arcillas; a los  $900^\circ\text{C}$  se descomponen los carbonatos que reaccionan con los compuestos arcillosos, creando compuestos puzolánicos<sup>8</sup>. A partir de los  $1000^\circ\text{C}$  se forman los silicatos y aluminatos (Gárate 2000; Cazalla 2002). El contenido en porcentaje de óxidos de silicio, aluminio y hierro ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) con respecto al contenido de óxidos de calcio (CaO) y magnesio (MgO), proporcionan el índice de hidraulicidad (Cazalla 2002:31).

<sup>7</sup> El proceso de la carbonatación se desarrollará en el punto 3.4.4, pág. 81 de este capítulo.

<sup>8</sup> Se denominan puzolánicos a los compuestos silíceos o aluminosilíceos. Su nombre procede de la localidad Italiana de Puzzuoli, ubicada en las faldas del Vesubio, rica en rocas volcánicas, que fueron ampliamente empleadas por los romanos en sus construcciones. Estos compuestos finamente machacados y adicionados a la cal en pasta, reaccionan con el hidróxido de calcio y proporcionan un mortero de mayor dureza y porosidad.

La hidraulicidad de la cal se puede conseguir también cuando no se parte de una caliza arcillosa; es decir, mediante la calcinación de una caliza pura junto a arcillas seleccionadas para conseguir, durante la cocción, la fusión de los componentes. Asimismo se pueden conseguir reacciones puzolánicas mediante la adición de cerámica cocida machacada (silicatos y aluminatos) a la cal apagada (hidróxido de calcio), que reacciona con ésta resultando en silicatos y silico-aluminatos de calcio hidratados, encargados de facilitar el endurecimiento bajo el agua y aportar mayor dureza final de la cal (Villaseñor y Barba 2011).

Si bien en área maya las cales que se emplearon para la elaboración de los estucos son fundamentalmente aéreas, procedentes de calizas muy puras o grasas (Schreiner 2002:15), se han reportado casos donde los estucos presentan compuestos volcánicos o meteoríticos<sup>9</sup> (Villaseñor y Barba 2011; Barba 2013; Villaseñor y Graham 2010; Magaloni 1995), que bien pudieron ser mezclados intencionadamente por los encargados de su ejecución, a sabiendas de las reacciones puzolánicas que se producían, proporcionando un incremento en la dureza y resistencia de los estucos una vez carbonatados.

### 3.3.1.2 La materia prima

Los datos históricos y fuentes etnográficas acerca del empleo de la piedra caliza se remontan al siglo XVI. Fray Diego de Landa en su obra *Relación de las cosas de Yucatán*, escrita hacia 1556, describe la abundancia de la piedra caliza y de *Sascab* en Yucatán, una tierra blanca que se utilizaba como material de carga para la fabricación de materiales de cal y que continúa en uso con los mismos fines (Villaseñor y Aimers 2009: 28).

Además de las piedras calizas ricas en carbonato cálcico, los constructores mayas emplearon conchas de moluscos o coral, ricos en carbonato cálcico, que calcinaron del mismo modo para producir cal (Schreiner 2002). El empleo de esta materia prima se da sobre todo en regiones pobres en calizas y cercanas a la costa, como en las zonas costeras del golfo de Yucatán (Russel y Dahlin 2007:413).

Las rocas calizas se clasifican según la naturaleza de sus componentes minerales accesorios o la del cemento que mantiene los granos unidos de forma compacta. Según esto, el nombre de caliza puede ir acompañado de adjetivos como arenosa, arcillosa, dolomítica, sílicea, ferruginosa, o conchífera si deriva de estructuras orgánicas (Sneyers y Henau 1969:225). La calidad de la cal resultante del material calizo dependerá de la pureza de la materia prima.

En su tesis doctoral, Thomas Schreiner (2002) describe la piedra caliza empleada por los mayas Itzaj en Petén, la cual es conocida con el término *Tzaal* y se identifica por ser suave, porosa y fácil de extraer. Se produce por un proceso natural de solución, precipitación química y re-deposición del material alterado, hallándose sobre los niveles de agua subterránea permanente, cerca de la superficie del suelo, en zonas mal drenadas de las Tierras Bajas Centrales y del Sur (2002:51). Esta piedra contiene un porcentaje variado de arcilla montmorillonita y sílice, que suaviza el apagado

<sup>9</sup> A finales del periodo cretácico impactó un meteorito en el noroeste de la península de Yucatán, en la región de Chicxulub. Materiales volcánicos derivados de este meteorito se han hallado en los estados de Tabasco, Chiapas, Quintana Roo, así como en Belice y Guatemala. Este tema se desarrollará en el apartado 3.3.3.

y confiere propiedades específicas a la cal. Comenta además que este tipo de piedra es el único que se quema mediante el sistema tradicional de piras para la obtención de cal destinada a la arquitectura (2002:52).

Así mismo, Schreiner hace una descripción de los nombres mayas que los caleros de Petén emplean para denominar a las calizas locales, en función de su dureza y porosidad. *Sascab tunich* es una piedra suave y porosa, similar a *Tzaal* que también es calcinada en Petén para elaborar cal, al igual que *Sak eel b'aach*, o piedra blanca, aunque esta última es algo más cristalina. Por el contrario, términos como *Toc tunich*, *Taman tunich*, piedra de cerro o piedra de fuego (2002:53), hacen referencia a piedras dolomíticas o silíceas muy poco porosas y no adecuadas para la obtención de cal.

### 3.3.2 Áridos

En términos genéricos, los áridos, también llamados agregados o cargas, son los compuestos inertes que se añaden al conglomerante (Cal) para elaborar la argamasa con la que se elaborarán los estucos. Cumplen una función fundamental dentro de este conjunto, ya que disminuyen la retracción, evitan el craquelamiento, estabilizan el volumen de la masa y confieren dureza, color y textura al mortero. Los áridos proceden de la desintegración natural o artificial de las rocas. El tamaño empleado en la elaboración de morteros se comprende entre 0,075 y 5mm (Cazalla 2002:18), si bien pueden hallarse granulometrías mayores, sobretodo en el caso de hormigones.

#### 3.3.2.1 Características físicas de los áridos

##### *Forma*

La forma que presentan los granos de los áridos se describen como cuerpos geométricos, pudiendo ser esféricos, elipsoidales, lascas y poliédricos (Alonso 2013:76; Gárate 2000:102). La forma de estos granos determinará la adherencia con el cementante y la porosidad final del mortero. Los áridos cuyos granos presentan formas redondeadas, como los cantos rodados, proporcionan un mortero con buena trabajabilidad y porosidad reducida al acomodarse mejor los granos entre las partículas de la cal. Por el contrario, producen poca adherencia entre el conglomerante y el árido. En cambio, los áridos con granos angulosos o rugosos, se adhieren mucho mejor al conglomerante, con lo que son siempre preferentes.

##### *Tamaño*

El tamaño de los granos de los agregados proporcionan las distintas granulometrías, clasificándose de forma general en gravas o arenas. El tamaño estándar de éstas, empleado en la elaboración de morteros, está entre los 5-10mm para las gravillas gruesas, 1,5-2mm para las arenas gruesas, 0,5-1mm para las arenas finas y 0,1-0,5mm para las arenas muy finas o impalpables (Gárate 2000:103; Alonso 2013:77). Para conseguir un mortero con buenas cualidades físico mecánicas, es importante que los áridos que se mezclen con la cal sean de granulometría variada, favoreciendo así la reducción de huecos y la acción ligante de la cal con los granos más gruesos (Cazalla 2002:18).

Cuando los áridos son pobres en partículas finas, el mortero se comporta irregularmente y el conglomerante actúa como carga fina en vez de como cementante. Por el contrario el exceso de arenas finas produce una disminución en la resistencia mecánica, reducción de la permeabilidad y formación de grietas y fisuras al endurecer el mortero (Alonso 2013: 82).

### 3.3.2.2 Características químicas de los áridos

#### *Composición*

Los áridos pueden ser síliceos, calizos o arcillosos, dependiendo del mineral dominante (Gárate 2000:102). Las arenas a emplear en la mezcla del mortero pueden contener limos, materias orgánicas o sales solubles, que pueden reaccionar con la cal alternando e interrumpiendo sus reacciones químicas, por lo que es muy importante que las arenas a emplear en el mortero estén exentas de este tipo de sustancias. El lavado de los áridos antes de ser utilizados es una buena forma de eliminar gran parte de estas sustancias contaminantes.

### 3.3.2.3 El empleo de *Sascab* como árido en los estucos del área maya

*Sascab* proviene de la palabra maya *Sah cab*, que significa “tierra blanca”. A su empleo como componente de las pastas de cal, tanto para la sillería y mampostería como para la elaboración de revestimientos, se hace referencia de nuevo en la obra de Fray Diego de Landa (2002) en un fragmento que dice: (...) *Que están los edificios muy cerca unos de otros y que son templos y que la razón de haber tantos es por mudarse las poblaciones muchas veces; y que en cada pueblo labraban un templo por el gran aparejo que hay de piedra y cal y cierta tierra blanca excelente para edificios (...).*

Como *Sascab* se identifican los carbonatos no consolidados, sobre los que se superponen capas de sedimentos calizos, que existen como afloramientos en gran parte de las Tierras Bajas. En zonas del sur de las Tierras Bajas, el *Sascab* se halla directamente bajo una fina capa de suelo. A pesar de su diversidad en la formación, composición y apariencia, el término *Sascab* se ha empleado para referirse localmente a los depósitos de carbonatos afectados por el intemperismo (Villaseñor 2010; Littman 1958; Pacheco *et.al* 2003; Muñoz 2006), que fueron muy empleados en la construcción de las ciudades mayas, y todavía sigue en uso en construcciones contemporáneas del área maya.

La geología de las Tierras Bajas, muestra variedad en las características físicas, mecánicas y químicas de los sedimentos de carbonatos y rocas, debido a los diferentes ambientes diagenéticos<sup>10</sup> que se vieron involucrados en su formación, entre ellos la deposición de detritos<sup>11</sup> de cal por procesos naturales de la flora y fauna o por el flujo de las aguas. Además la disolución de los carbonatos ha estado ocurriendo desde su origen, debido a las corrientes pluviales y subterráneas, favoreciendo todo ello la diversidad compositiva de los materiales carbonatados (Villaseñor 2010:21). Así pues el *Sascab* se presenta tanto como material suave y compacto que se desprende fácilmente de las lajas superiores de caliza (Alonso 2013:87), como en forma de tierra suelta en los bancos naturales donde se hallan, denominados localmente *Sascaberas*.

<sup>10</sup> Conjunto de procesos geológicos mediante los cuales un sedimento se transforma en roca sedimentaria.

<sup>11</sup> Cada una de las partículas que resulta de la descomposición de las rocas o de otros cuerpos orgánicos.

En referencia a la composición de este material, destacan los trabajos de Littman (1958), donde expone los resultados de caracterización de muestras de *Sascab* procedentes de Uxmal, Palenque, Sayil, Chichen Itzá (Estado de Yucatán) y de la isla de Jaina (Estado de Campeche), que si bien aparentemente son distintos, presentando tonalidades que van del rojizo (Uxmal y Sayil), al amarillento (Chichen Itzá) y al blanco (isla Jaina); la composición de todos ellos está constituida por carbonato de calcio y carbonato de magnesio en proporciones variables. Un análisis más reciente lo encontramos en Pacheco *et.al* (2003) donde se examinan muestras de *Sascab* procedentes de la ciudad de Mérida (Yucatán), determinando que este material se compone en un 80% de carbonatos de calcio, 11% de carbonato de magnesio, 2% de arcillas y un 7% de otros compuestos como sulfatos, cloruros, nitratos u óxido de hierro. La presencia de carbonato de magnesio en esta tierra podría deberse a un proceso de disolución de las calizas dolomíticas<sup>12</sup> situadas en zonas superiores, su arrastre y deposición con el agua de lluvia (Littman 1958:174).

Generalmente, en las Tierras Bajas mayas, los estucos presentan *Sascab* como agregado, aunque en ocasiones las arenas añadidas pueden ser trozos de cal fraguada, por la reutilización de estucos molidos, trozos de calcitas clásticas, arenas duras como cuarzos y feldspatos (Magaloni 1999:159) o conchas de moluscos (Littman 1957a:139). Otra carga empleada en la mezcla de cal es el material residual procedente de la talla de sillares para la construcción. En el proceso de explotación de la piedra caliza en cantera y en la talla de ésta para la puesta en obra, se producían grandes cantidades de piedra pulverizada, que era aprovechada como carga en estas pastas de cal, pudiéndose identificar en los estucos por su naturaleza angular (Schreiner 2002:55).

### 3.3.3 Aditivos

Los aditivos son sustancias o productos que añadidos a los morteros en pequeñas proporciones, antes o durante el amasado, producen modificaciones específicas en las propiedades de dicho mortero, bien en estado fresco o una vez endurecido (Cazalla 2002:33). En las civilizaciones antiguas ha sido habitual el empleo de ciertas sustancias añadidas a las pastas de cal para mejorar o procurar ciertas características en el producto final. En el antiguo Egipto, se emplearon sustancias como la caseína, para aglutinar y retardar el fraguado de yesos, leche de higo para acelerarlo, sangre y colas animales como aglutinantes (Gárate 2000; Cazalla 2002). También fibras orgánicas, como paja o cáñamo machacado para mejorar la cohesión del mortero (Sickels 1980, citado en Zalbidea *et.al* 2011-12). Griegos y romanos agregaron a sus morteros ladrillo triturado y ceniza volcánica para mejorar la resistencia mecánica y durabilidad de los morteros una vez endurecidos, gracias a las reacciones hidráulicas y puzolánicas generadas en combinación con el hidróxido de calcio. Otros aditivos mezclados en las pastas de cal de morteros medievales son la cerveza, cera de abejas, zumo de frutas, gluten, malta, arroz, azúcar y orina (Sickels 1981, citado en Álvarez *et.al* 1995:57).

La naturaleza de estas sustancias añadidas históricamente en las pastas de cal puede ser orgánica o inorgánica, y ambos tipos de materias fueron también empleadas por los antiguos mayas en sus construcciones, con la intención de mejorar las propiedades de los revestimientos de estuco y hacerlos más adecuados a las condiciones ambientales. A continuación se describen los principales aditivos empleados en la elaboración de los estucos mayas, referidos en fuentes etnohistóricas y etnográficas, o por identificación química analítica.

<sup>12</sup> El carbonato de magnesio, presente en las rocas calizas dolomíticas, es hasta 8 veces más soluble que el carbonato de calcio.

### 3.3.3.1 Orgánicos

Los aditivos orgánicos son aquellas sustancias naturales de origen animal o vegetal que se añaden al mortero sin ser modificadas.

Aunque el empleo de miel en la elaboración de estucos mayas ha sido mencionado por algunos investigadores (Abrams 1994; Littman 1957), los aditivos esenciales que jugaron un papel fundamental en la elaboración y mejora de las propiedades de estos estucos fueron principalmente los exudados vegetales, procedentes de las cortezas de los árboles. El procedimiento de macerado en agua, relatado ya en documentos coloniales, mediante el cual estas sustancias eran extraídas, indica que sólo las gomas pudieron ser empleadas, ya que otros exudados de procedencia vegetal como las resinas o los mucílagos, son poco o nada solubles en este medio.

Según Matteini y Moles (2008), las gomas vegetales son materiales amorfos, segregados o extraídos de determinadas plantas, que pertenecen químicamente a la familia de los polisacáridos, los cuales se producen por la polimerización condensada de numerosas moléculas de azúcares sencillos (monosacáridos), unidos por enlaces glucosídicos que forman una estructura muy compleja. Estas sustancias son únicamente solubles en agua e insolubles en otros disolventes orgánicos como el alcohol. Esta propiedad se debe a la presencia molecular de grupos hidroxilos, que pueden formar fácilmente enlaces intermoleculares de hidrógeno con el agua, resultando en sustancias altamente hidrófilas (2008: 125). El término goma se ha empleado confusamente a lo largo de la historia para referirse a materiales elásticos de origen natural y artificial, así como a otras secreciones vegetales como las resinas (Whistler y BeMiller 1959; Matteini y Moles 2008).

*(...)Lo alto era de terrado encalado muy fuerte, como allá se hace con cierta agua de corteza de un árbol (...) Otros árboles de cuyas cortezas hacen los indios cubillos para sacar agua para sí, y otros de que hacen las sogas, y otros de cuyas cortezas majadas hacen un caldo para bruñir con él los encalados, y los hace muy fuertes (...).* Estas frases forman parte de la mencionada obra de Fray Diego de Landa (2002), donde queda patente el empleo de los extractos de cortezas de árboles durante el proceso de estucado.

A principios del siglo XX, durante los trabajos que llevó a cabo el proyecto de la Carnegie Institution of Washington en Chichen Itzá, se recogieron distintos testimonios de albañiles expertos, que quedaron reflejadas en la posterior publicación del proyecto (Morris *et.al* 1931). En ella se apunta el empleo de un líquido para humectar la superficie mientras se aplanaba y bruñía el estuco, y se describe cómo la corteza del árbol de *Chucum* se ponía a remojar en tinajas, y después de varios días, cuando el agua ya estaba colorada por la disolución de la goma, estaba lista para emplearse. La cal, humedecida con este líquido, tomaba un magnífico pulido de color rojo encendido, prácticamente impermeable al agua (Morris *et.al* 1931: 224).

El químico Edwin Littman (1960), se interesó por las propiedades que otorgaban estas gomas en las pastas de cal, realizando en los años sesenta los primeros estudios con probetas de mortero de cal aditivado con las especies arbóreas Chucum (*Havardia Albicans*), Chacté (*Caesalpinia Mollis*), Jabín (*Piscidia Piscipula*) y Chacah (*Bursera Simaruba*), concluyendo que estas gomas tienen un efecto en las propiedades de la cal, estabilizando la estructura durante la carbonatación.

Posteriormente, Diana Magaloni (1994, 1995, 1998, 2001), realiza estudios de caracterización de diversas muestras de estuco y pintura mural que permitieron la reconstrucción de las técnicas de manufactura de los morteros y enlucidos de sitios como Teotihuacan o Bonampak. De sus estudios deduce que la adición de las gomas orgánicas mejoró considerablemente el resultado de estas pastas, formándose una pasta más trabajable y con buenas cualidades de fraguado.

La identificación de estos compuestos orgánicos mediante técnicas analíticas no es nada sencilla, debido en parte a la fuerte degradación de estos compuestos. Las señales que producen bajo examen son muy bajas y pueden ser interferidas y ocultas por otros compuestos como la calcita. Se incorporan en esta línea trabajos más recientes de identificación de aditivos orgánicos, tanto de los estratos preparatorios como de los aglutinantes empleados en la pintura mural, los estudios de M<sup>a</sup> Luisa Vázquez de Ágredos (2006, 2010), los trabajos de Doménech *et.al* (2006,2014) para la identificación del azul maya, los estudios cromatográficos realizados en muestras de estuco de varios sitios de los estados de Campeche y Yucatán (Guasch 2013), o los realizados sobre muestras de estuco del sitio Dzibanché (Quintana Roo) (Straulino 2015).

Las técnicas empleadas hasta la fecha para la identificación de estos compuestos han sido la Microscopía electrónica de barrido con microanálisis de rayos x por dispersión de energías (SEM/EDX), mediante la cual se puede detectar la presencia de este material orgánico por un incremento de carbono; La espectroscopia de absorción de rayos infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR), que permite identificar la presencia de polisacáridos (García y Jáidar 2013); La Cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC/MS), la pirolisis con cromatografía de gases-espectrometría de masas y la cromatografía de líquidos de alta resolución (HPLC), a través de las cuales se identifican y cuantifican las señales de las cadenas de los polisacáridos (Guash 2013:237). A pesar de la complejidad de estas técnicas<sup>13</sup> y del cada vez más creciente banco de datos para el cotejo de muestras, la identificación de una especie vegetal en concreto, en una muestra de estuco no ha sido posible.

### 3.3.3.2 Inorgánicos

Los aditivos inorgánicos comúnmente añadidos a las pastas de cal, pueden ser a su vez inertes, o reactivos, según sea su comportamiento al mezclarse con el conglomerante. Los aditivos inertes hacen referencia a aquellos que modifican las propiedades físicas del mortero, como el color, la plasticidad o la textura, pero que no intervienen en el proceso de fraguado. Por el contrario, los aditivos reactivos, participan en el fraguado y en la forma de endurecer del mortero debido a su reacción con el hidróxido de calcio, confiriendo propiedades hidráulicas o puzolánicas, que como se describió anteriormente, resultan en un mortero de mayor dureza y resistencia mecánica.

<sup>13</sup> Para una descripción detallada de las técnicas cromatográficas véase (Doménech y Vázquez de Ágredos 2006; Guash 2013; Doménech *et.al* 2014).

Los expertos mayas emplearon diversidad de aditivos inorgánicos en la elaboración de sus estucos. Gracias a la ciencia y a las diversas técnicas de caracterización químico-analítica, se ha podido identificar la naturaleza y composición de estos aditivos inorgánicos, siendo frecuente el empleo de arcillas como aditivos inertes y de esquiras de vidrio y cenizas de origen volcánico como aditivos reactivos.

Las arcillas fueron añadidas a las pastas de cal como lubricante o plastificante mineral, sobre todo en las mezclas destinadas a formar el enlucido de la obra mural, es decir el que daba soporte a la pintura. Estas arcillas son principalmente de tipo laminar y fibroso como el caolín o la paligostita (Vázquez de Ágredos y Horcajada 2017). Su presencia produjo sobre todo un incremento en la trabajabilidad del mortero en estado fresco, un mejor pulimentado de la superficie una vez aplicado, y un secado más lento y gradual una vez puesto en obra.

La adición de arcillas en las pastas de estuco, puede responder también a una cuestión geográfica y de disponibilidad de los recursos naturales, ya que la presencia de arcillas acompañando a la matriz de cal, se identifica mayormente en los enlucidos de sitios ubicados en las Tierras Bajas Mayas del Norte del periodo Clásico (Vázquez de Ágredos 2006), aunque la presencia de minerales arcillosos también identificados en estucos de sitios como Palenque (Vázquez del Mercado *et. al*), Calakmul (García-Solís *et. al* 2006), Piedras Negras (Abrams *et. al* 2012), San Bartolo (Hurst 2004), Nakum o La Blanca (Doménech y Vázquez de Ágredos 2006), pueden responder a una cuestión de composición y presencia junto a la caliza, y no a la adición intencionada durante el proceso de elaboración.

Las primeras referencias sobre la adición de materiales reactivos con efectos hidráulicos vienen de la mano de Littman (1958), quien analiza varias muestras de estucos extraídas del Templo IV de Comalcalco (Estado mexicano de Tabasco), en las que se identifican materiales amorfos de naturaleza silíceo, en una capa de estuco intermedia (entre el mortero y el enlucido), razón por la que atribuye mayor fuerza y dureza en este estrato.

Villaseñor y Graham (2010) caracterizan muestras de estuco de Calakmul (Estado mexicano de Campeche) y Lamanai (Norte de Belice), donde identifican compuestos en forma de cristales aciculares y partículas ricas en dióxido de silicio, en ocasiones con la forma de hoz característica de los vidrios volcánicos, que sugiere que estos materiales fueron añadidos intencionadamente, a sabiendas de las reacciones de hidraulicidad, para conseguir mayor resistencia en sus estucos.

En muestras de estuco y de mortero procedentes de Rio Bec (Campeche, México), se han identificado tres materiales altamente reactivos con el hidróxido de calcio y el agua: partículas vítreas de naturaleza volcánica, fitolitos<sup>14</sup> e inclusiones arcillosas, que forman parte de reacciones puzzolánicas e hidráulicas en estos compuestos de cal (Guillot 2014). Dada la ausencia de sistemas volcánicos en las Tierras Bajas, la procedencia de estos materiales piroclásticos puede deberse a dos hipótesis; en primer lugar que estos materiales fueran transportados desde el sur de las Tierras Altas, a través de largas rutas comerciales, junto a materiales de similar naturaleza como obsidiana o jade. En segundo lugar, que estas partículas cristalinas fueran transportadas

<sup>14</sup> Mineralización de un organismo vivo, en este caso una planta, por deposición de dióxido de silicio (sílice amorfa o hidratada).



por el viento y depositadas en algunas áreas de las Tierras Bajas. Diferentes estudios (Espindola *et.al* 2000; Macías 2007) indican que así como en 1982 el volcán El Chichón (Chiapas) entró en erupción; en tiempos prehispánicos, las Tierras Bajas estuvieron cubiertas por cenizas volcánicas en varias ocasiones durante los últimos dos milenios (Guillot 2014), por lo que estas partículas cristalinas estarían al alcance en numerosas áreas de las Tierras Bajas.

### 3.4 Proceso de elaboración

A pesar de las escasas evidencias arqueológicas de zonas de producción de cal en las proximidades a los sitios arqueológicos, la tecnología prehispánica de la cal ha suscitado mucho interés a nivel arqueológico, antropológico y medioambiental. Gracias a los diferentes estudios etnográficos que se comenzaron a desarrollar desde principios del pasado siglo XX, se ha podido constatar la gran demanda laboral necesaria para la producción de la cal, abordando cuestiones como el tipo y la cantidad de combustible necesario para la construcción de las piras de calcinación, o la extracción y procesado de la piedra caliza (Morris *et.al* 1931; Abrams y Rue 1988; Schreiner 2002; Russell y Dahlin 2007), teniendo en cuenta que todos los procesos implicados se realizaron sin el empleo de herramientas metálicas, sin el uso de la rueda (Villaseñor y Barba 2011:83) ni tracción animal.

#### 3.4.1 Procesamiento del conglomerante

##### 3.4.1.1 Extracción de la piedra caliza

Tomas Schreiner (2002), a través de sus estudios etnográficos, describe cómo la piedra caliza se explota en afloramientos superficiales (Fig.3.7). En la región de Petén la caliza se mina de la superficie del suelo, extrayéndola con varas o palos afilados, mediante los cuales se hace palanca para obtener piezas tabulares. La selección de la piedra caliza (*Tz'al*) requiere de gran experiencia, ya que como se mencionó anteriormente, no toda la piedra caliza que aflora en la geología del área maya es adecuada para la elaboración de cal. Las piedras destinadas a calcinarse en las piras de leña se adecúan, reduciendo las grandes rocas con golpes angulares de martillo, para conseguir piezas tabulares. Después, cada piedra se vuelve a partir hasta conseguir piedras del tamaño de un puño. El tamaño de la piedra para la correcta calcinación en la pira es fundamental, ya que piezas demasiado grandes producirían una combustión incompleta, y piedras con un tamaño demasiado pequeño ahogarían los espacios entre éstas, no permitiendo la correcta difusión del calor en la pira (Schreiner 2002:54).

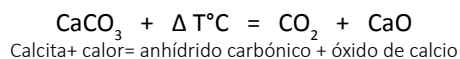


Fig. 3.7 Afloramientos de piedra caliza cerca del sitio arqueológico La Blanca, Petén.

#### 3.4.1.2 Calcinación

##### *Fundamento del proceso*

Este proceso consiste en la quema de piedras calizas a elevadas temperaturas para su transformación en óxido de calcio o cal viva, según la reacción:



La temperatura de calcinación varía según la composición química de la materia prima, siendo entre 900-1000°C para calizas más puras y entre 700-800°C para calizas dolomíticas (Cazalla2015). Las características de la cal viva obtenida dependerán de distintas variables que ocurren en este proceso, como son el tamaño de partícula que se calcina, la temperatura de calcinación, los gases emitidos y el tiempo de cocción. Este proceso de cocción del carbonato cálcico se resume en cinco fases, conocidas como cinética de la cocción, donde el frente de descarbonatación avanza del exterior al interior.

Dependiendo del tamaño de las partículas a calcinar, de la temperatura, la ubicación en el horno y la permanencia en éste, se pueden dar diferentes niveles de cocción.

- o Parcialmente cocidas: Presentan un núcleo interior crudo ( $\text{CaCO}_3$ ), producen baja retracción y densidad aparente y alta reactividad química en el mortero (Cazalla 2015). Se puede dar en las partículas de caliza con tamaños demasiado grande.
- o Cocidas correctamente (*Soft-burned*): Han completado la calcinación y su transformación completa en  $\text{CaO}$ . Tienen baja densidad aparente y alta reactividad en agua (Rossell 2013; Cazalla 2015).
- o Sobrecocidas (*Hard-burned*): Son las partículas que han rebasado el punto de cocción, produciéndose la sinterización por exceso de temperatura. Es más fácil que se de en las partículas más pequeñas y no son adecuadas por su alta densidad aparente, baja porosidad y baja reactividad en agua (Cazalla 2015).

Según Rossell (2013), para obtener una cal viva homogénea con mayor superficie específica ( $S_{\text{esp}}$ )<sup>15</sup>, es conveniente partir de partículas de caliza de tamaño intermedio y cocerlas a menores temperaturas durante un tiempo más prolongado, facilitando la eliminación del  $\text{CO}_2$  producido, para impedir la recarbonatación a altas temperaturas (Fig.3.8).

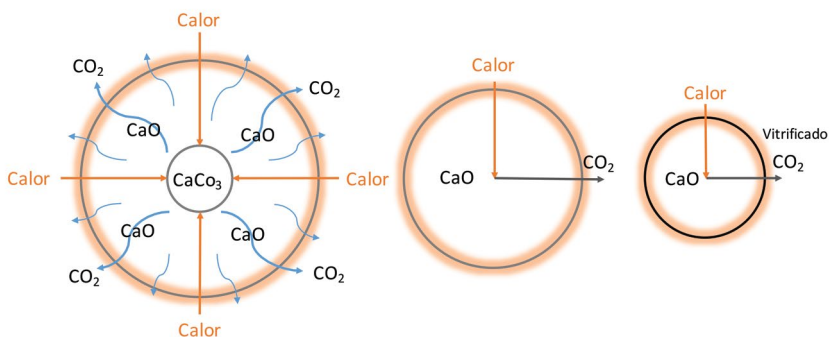


Fig.3.8 Influencia del tamaño de partícula para la correcta calcinación del carbonato cálcico. Partículas parcialmente cocidas (izda); partículas correctamente cocidas (centro) y partículas sobrecocidas (Dcha). Basado en Rosell 2013.

### La quema de cal en Mesoamérica

El método inicial para una quema útil de cal consistió posiblemente en colocar pequeñas cantidades de material calizo encima o dentro de piras de leña seca. Aunque no es eficiente, ya que las piras de madera más seca arden rápida e incontrolablemente con alta pérdida de calor radiante, este sistema más primitivo podía realizarse con la madera caída, que era fácilmente recogida y sin necesidad de ser cortada a medida (Schreiner 2002:16).

<sup>15</sup> La superficie específica ( $S_{\text{esp}}$ ) de la portlandita es la superficie donde se produce la reacción de carbonatación en la que se desarrollan los cristales de carbonato cálcico, con lo que a mayor  $S_{\text{esp}}$  del cristal, mayor será el área de carbonatación (Pocostales 2015:45).

Las caleras tradicionales mesoamericanas son estructuras construidas con leña fresca, con alto contenido en agua (50%), que se apila densamente y sobre la cual se distribuye cuidadosamente la carga de piedra caliza (Fig.3.9). Este sistema es capaz de llegar y mantener los 900°C. El calor se concentra en el centro de la pira, desprendiéndose hacia arriba junto a otros gases de la combustión, y se ventila lateralmente con aire frío para mantener la quema. Por ello el funcionamiento de este sistema debe considerarse como el de un horno y no como una pira de leña (Schreiner 2004:357).



Fig. 3.9 Calera de madera circular con piedra caliza dispuesta para quemar. Fuente Morris *et.al* 1931

En su estudio, Schreiner clasifica las caleras tradicionales mesoamericanas en siete tipos regionales, atendiendo al modo de apilar la leña para la quema. De estas variantes, identifica dos sistemas empleados en Petén; una pira cuadrada con dos pilas paralelas de troncos rectos y compactados, propia de la región de los lagos de Petén, y otra pira cuadrada realizada con capas de troncos perpendiculares alternados, que a día de hoy se emplea en el norte de Petén (Schreiner 2002:32) (Fig.3.10). Estos sistemas de horno a su vez podían quemarse tanto a nivel del suelo como en un hoyo excavado, y contar con entradas de aire laterales para mejorar la combustión.

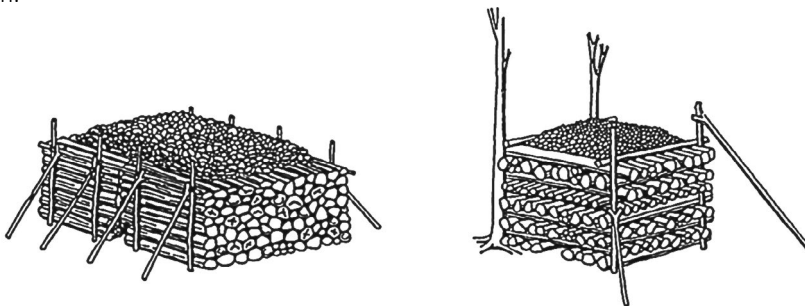


Fig. 3.10 Tipología de caleras 2 y 4 (Izda. y Dcha.), tradicionalmente empleadas en el área de Petén. Tomado de Schreiner 2001

Con su trabajo experimental, queda comprobada la alta eficiencia de estos complejos hornos de pira. A pesar de esta eficacia, la producción de tan altas cantidades de cal supuso un consumo grande de combustible. En relación al cálculo de volúmenes de madera empleada para la fabricación de cal, existen discrepancias entre los estudios realizados hasta la fecha, encontrando datos muy extremos que calculan desde la tala de 0,13 hectáreas anuales de bosque en el periodo Clásico, en Copán (Abrams y Rue 1988), hasta la tala de 400 hectáreas anuales durante la ocupación de Mayapán (Russell y Dahlin 2007, citados en Villaseñor y Barba 2011:84).

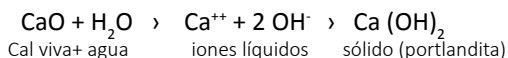
El proceso de la quema de la cal debió de contar con una amplia zona, fuera de las áreas centrales de las ciudades, para disponer fácilmente de la madera necesaria para la construcción de estas piras. Este hecho, unido a la inexistencia de una estructura constructiva fija, contribuye a la falta de evidencias en el registro arqueológico; cuya identificación se limita a una fina capa de cenizas y fragmentos de piedra caliza que presentan diferentes grados de calcinación (Straulino 2015:31).

A pesar de que estos hornos de pira fueron extensamente empleados por los mayas para calcinación de la caliza, se han documentado vestigios de hornos construidos, posiblemente para la quema de cal, a lo largo del área maya (Copán (Abrams y Freter 1996), Cauinal (Fauvet-Barthelot 1986), Cozumel (Freidel y Sabloff 1984) y Pulltrouser Swamp (Ettinger 1983), citados en Ortiz *et.al* 2015). Recientemente, se han hallado en diversas áreas de Yucatán, estructuras anulares consistentes en oquedades excavadas en la roca y con un muro constructivo en su interior. De ellos se ha obtenido material derivado de la producción de cal como piedras calcinadas, concreciones calcáreas, cenizas o carbón. Mediante datación arqueomagnética estos hornos se han situado en el periodo Clásico (900-1000 n.e) y en época Colonial (1600 n.e), confirmando su actividad en tiempo prehispánico y su continuidad a lo largo de los siglos (Ortiz 2014, Ortiz *et.al* 2015).

### 3.4.1.3 Apagado

#### *Fundamento del proceso*

Para que la cal viva pueda ser empleada, es necesario su apagado o azogado. Este proceso supone poner en contacto el óxido de calcio (que ha sido desprovisto de agua y dióxido de carbono tras la calcinación) con agua para su activación. La cal viva muestra gran avidez por el agua, absorbiéndola a través de sus poros, desencadenando una fuerte reacción exotérmica y una gran fuerza de expansión interna que produce la desintegración de ésta (Ngoma 2009:11). La reacción química que se produce en la cal durante el apagado es (Pocostales 2015:44):



Durante esta fase se forman cristales de hidróxido de calcio (portlandita y brucita), que presentan una simetría hexagonal, en la que pueden predominar los prismas o las plaquetas hexagonales, dependiendo de factores como la temperatura, la presión ambiental y la relación de cal viva-agua (Rossel 2013:61). Estos cristales de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  se forman por precipitación o solución-precipitación, presentando alta  $S_{\text{esp}}$  (hasta  $20\text{m}^2/\text{g}$ ) y alta capacidad de retención de agua (Cazalla 2002:26).

La velocidad de apagado es una medida del tiempo que tarda en completarse el proceso de apagado, y se considera terminada al alcanzar la temperatura su punto máximo (entre 80 y 95°C). El tiempo que se tarda en alcanza este punto máximo depende a su vez de la reactividad de la cal viva<sup>16</sup>. La temperatura del apagado también influye en el tamaño final de las partículas de hidróxido de calcio, obteniéndose tamaños más pequeños y cristalinos en temperaturas cercanas a los 100°C y fases amorfas a temperatura ambiente (Coloma-Álvarez 2008, citado en Pocostales 2015:48). Algunos factores que influyen en el proceso de apagado de la cal y que condicionan las propiedades finales de ésta son (Cazalla2002:25):

- o Calcínación de la cal: Con una cocción dulce se consigue una alta porosidad y  $S_{\text{esp}}$  de la cal viva, que en el apagado presenta mayor reactividad y velocidad de hidratación. En la cristalización se originan un gran número de cristales pequeños. En el apagado de la cal procedente de cocción fuerte se produce una menor concentración iónica, con una pequeña sobresaturación y consecuentemente una menor velocidad de germinación de cristales, que se presentan en tamaños más grandes (Rossell 2013:58).
- o Características físico-químicas de la cal viva: La cal calcítica genera una reacción más rápida que la cal dolomítica. Igualmente, las impurezas presentes reducen la absorción de agua ralentizando la hidratación. El tamaño de las partículas de cal viva también es importante ya que a menor tamaño, más rápido será el proceso de hidratación.
- o Temperatura de hidratación: Generalmente las temperaturas altas favorecen la hidratación, consiguiéndose partículas más pequeñas; aunque dependerá de la reactividad de la cal. Si bien en cales muy reactivas se puede emplear agua fría, en cales poco reactivas es preferible emplear agua caliente.
- o Tiempo de hidratación: Puede ser decisivo si éste es demasiado corto ya que pueden quedar partículas de cal viva que reaccionen posteriormente en el mortero, provocando grietas o fracturas.
- o El agua: Un exceso de agua puede cambiar la temperatura de la reacción, generando una cal apagada poco reactiva. Un volumen insuficiente de agua también puede producir una cal con baja plasticidad. Las características químicas del agua también afectan a la velocidad de hidratación; la presencia de iones de cloro y magnesio la incrementan, mientras que los carbonatos y sulfatos la ralentizan (Rossell 2013:59; Pocostales 2015:48), estos últimos por formar una película de sulfato de calcio insoluble alrededor de las partículas de cal viva (Ngoma 2009: 12).

Se conocen diversos métodos para el apagado de la cal que dependen principalmente de la forma en la que la cal se pone en contacto con el agua. De este proceso dependerá la textura en la que se produzca el hidróxido de calcio; es decir en forma de polvo o en forma de pasta. A nivel industrial, la cal se apaga generalmente en autoclave, mediante vapor, o por aspersión de agua en hidratadores mecánicos (Pocostales 2015:45), de los que se obtiene el hidróxido de calcio comercial en forma de polvo.

<sup>16</sup> La reactividad es la capacidad de la cal viva de responder con un cambio químico al mezclarse con el agua. Este proceso se ve afectado por la pureza, la homogeneidad y la cristalinidad de la materia prima; la distribución de la carga en el horno, el tamaño de las partículas en la cocción, la temperatura alcanzada y el tiempo de calcinación entre otros factores (Rossell 2013:56).

Tradicionalmente se conocen varios métodos elementales para el apagado de la cal que se han venido empleando a lo largo de la historia: el apagado por inmersión (o fusión) y el apagado por exposición (Gárate 2002:107; Ngoma 2009:12; Cazalla 2002:24).

### *Apagado por inmersión*

Es el sistema más extendido por el cual la cal viva se coloca en un recipiente junto al agua conveniente y se remueve hasta obtener una pasta. La cal no debe ser anegada con más agua de la necesaria para evitar su ahogamiento. Durante la reacción, los iones  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{OH}^-$  que proceden de la disolución de las partículas sólidas de  $\text{CaO}$ , dan lugar a una solución saturada a partir de la cual se da la cristalización de hidróxido de calcio (portlandita). El agua añadida se va saturando conforme el óxido de calcio se va disolviendo, hasta alcanzar la sobresaturación (Pocostales 2015:47). El producto obtenido es la cal en pasta. Tradicionalmente, esta cal conlleva su envejecimiento en agua, y la idea de que este tiempo de maduración mejora notablemente sus propiedades. Autores clásicos como Plinio o Vitrubio (Gárate 2002; Rossell 2013), aconsejaban que la cal permaneciera bajo agua durante tiempos prolongados de hasta tres años. Si bien se ha demostrado que al permanecer la cal sumergida en agua prolongadamente, se favorece la exfoliación de los cristales prismáticos de portlandita, cambiando su forma a cristales tabulares más pequeños y con mayor  $S_{\text{esp}}$  (Cazalla *et.al* 2000; Goretí *et.al* 2011); recientes trabajos han concluido que la evolución de las pastas de cal no siempre mejora (entendiendo mejora como aumento de la plasticidad y retención de agua) (Hansen *et.al* 2000), o lo hace hasta un tiempo máximo, en torno a 24-36 meses (Mascolo *et.al* 2010, citado en Rossell 2013:69).

### *Apagado por exposición ambiental*

La cal viva se extiende en el suelo para que se apague mediante la humedad ambiental. Este proceso requiere de varios meses ya que la reacción de apagado se va produciendo desde el exterior hacia el interior de las partículas de cal, con el inconveniente de que se origina una pérdida considerable de material por carbonatación de la cal ya apagada. Para evitar esta reacción, en este método de apagado se acostumbra también a cubrir la cal con arena, reteniendo la humedad y evitando el contacto con el  $\text{CO}_2$ .

### *El apagado de la cal en Mesoamérica*

La forma en la que los especialistas mayas prepararon esta cal viva para su uso en la elaboración de los estucos difiere según las fuentes etnográficas, encontrando diversos sistemas de apagado que pudieron haberse dado en tiempos prehispánicos. Factores geográficos, económicos, sociales o técnicos constituyen el abanico de posibilidades técnicas y las diferencias de ejecución que pudieron haberse dado en las distintas fases de elaboración de los estucos (Villaseñor 2009).

Dependiendo del resultado final de la cal apagada, los métodos de apagado que pudieron haber sido empleados en Mesoamérica son el apagado por exposición ambiental (pudrición), del que se obtiene la cal apagada en polvo; el apagado por inmersión, del que se obtiene la cal apagada en forma de pasta y el apagado por mezclado en caliente (*Hot Mix*), mediante el cual la cal se apaga a la vez que se obtiene el mortero en forma de pasta densa.

### *Apagado por pudrición*

En la publicación de los trabajos realizados en Chichen Itzá por la Carnegie Institution of Washington (Morris *et.al* 1930), se describe cómo los maestros caleros acostumbran a no tocar el montículo de cal viva resultante de la quema, hasta que éste se haya apagado por la lluvia o el rocío. Gradualmente este montón se va hinchando, multiplicando el volumen y transformándose en un polvo blanco y suave. Aunque este polvo ya se puede usar, los expertos albañiles prefieren no preparar mortero con cal de menos de un año (Morris *et.al* 1930:223). Este proceso descrito corresponde al apagado por exposición a cielo abierto (conocido en el área maya como apagado por pudrición)(Fig.3.11 ).



Fig. 3.11 Cal viva resultante de la calcinación de la piedra caliza, expuesta a la intemperie para su apagado. Fuente Morris *et.al* 1931.

De los tres métodos de apagado en el norte de las Tierras Bajas que describe T. Schreiner en su estudio (Schreiner 2002), afirma que el apagado por pudrición a cielo abierto todavía se emplea hoy en día. Para este método, la cal viva recién calcinada se deja en el sitio para que absorba la humedad ambiental, del suelo o de la lluvia. Al principio esta cal se expande y se convierte en un polvo blanco y brillante de hidróxido cálcico. Después de un tiempo se empieza a formar una costra oscura en la superficie, aunque el interior permanece intacto. Según los expertos, esta maduración de la cal se debe prolonga hasta al menos dos años para garantizar la durabilidad de los trabajos arquitectónicos (Schreiner 2002:57). La cal viva puede apagarse también dejándose expuesta mezclada junto al árido correspondiente (Muñoz 2006:60).

Una variante de este método corresponde al apagado por aspersión (Schreiner 2002:59). Este sistema fue observado en el área central de Petén y se describe como un método para obtener cal apagada en polvo con la que se construyen los suelos apisonados en esta zona. Para realizar el apagado, la cal viva recién calcinada, se protege con un techo provisional y se rocía con agua arrojada desde un balde con la propia mano. Al día siguiente el polvo resultante se tamiza y almacena.

Para este método de apagado por exposición ambiental, las piedras de cal viva recién calcinadas no necesitan ser transportadas ni preparadas para su apagado; no se requiere de la construcción de estructuras como balsas de apagado, ni tampoco es necesario el transporte de agua hasta el lugar de la quema; por lo que supone un sistema rápido y cómodo de apagar la cal, teniendo en cuenta la elevada humedad relativa del área, así como las frecuentes lluvias.



### *Apagado por inmersión*

Otro método posible de apagado de la cal, apoyado por varios investigadores es el apagado por inmersión (también llamado por fusión), es decir mediante la introducción de la cal viva en balsas de agua, formándose una pasta densa de hidróxido de calcio como resultado (Magaloni 2001; Vázquez de Ágredos 2006 y 2010, citado en Guasch 2016:73)(Fig.3.12). Según la reconstrucción técnica que elabora Magaloni (2001), la cal viva era mezclada junto al *Sascab* en seco, permitiéndose una mejor distribución de las partículas, y esta mezcla era sumergida en agua en la que previamente se había dejado macerando cortezas gomosas. El hecho de apagar la cal con esta solución supone un incremento de la solubilidad de los óxidos de calcio y un aumento de la temperatura que favorece la hidrólisis de los polisacáridos que constituyen la goma, así como el movimiento e integración de las partículas de *Sascab*, logrando una masa muy homogénea (2001:161).



Fig. 3.12 Apagado de cal por inmersión en balsas excavadas. Sitio arqueológico Yaxhá, Petén. Fotografía B. Carrascosa 2008

Este proceso implica el empleo de recipientes o balsas contenedoras del agua de apagado para sumergir la mezcla seca. En el registro arqueológico son prácticamente nulas las evidencias que apoyen este método si las comparamos con las grandes fosas romanas empleadas para el apagado de la cal. No obstante se cuenta con el registro de una capa fina de carbonato cálcico asociado con nódulos cementados de carbonato cálcico, conchas, tiestos y carbón en el sitio de Laguna de Placencia, Belice; datado para el Clásico Temprano. Esta evidencia se comparó con la excavación de una pila moderna de apagado, en la misma ciudad, concluyéndose que es posible obtener esta fina capa carbonatada del proceso reiterado de apagar cal (Mackinnon y May 1990, citado en Villaseñor 2010:54), con lo que esta evidencia podría tratarse de una especie de depósito contenedor para tal fin.

### *Apagado por mezcla en caliente (Hot Mix)*

Es un método tradicional en el que se apaga la cal viva mezclada con la arena, manteniéndose la mezcla húmeda hasta su empleo. Esta técnica ha sido empleada en Europa desde la Edad Media, según fuentes históricas, tanto para elaborar morteros de construcción como para revestimientos. Este método busca maximizar la temperatura del apagado, dentro de ciertos parámetros, lo cual influye en el comportamiento final del mortero. El resultado de esta técnica en revocos y enlucidos es el incremento de la resistencia debido a una mejor unión de los granos de cal y arena a medida que la cal se expande y el calor se libera por la reacción de hidratación (Margalha *et.al* 2011).

N. Copsey describe el proceso: *“Para conseguir este efecto se debe agregar de una vez suficiente agua en el apagado, o ir añadiendo constantemente por rociado. La temperatura del proceso alcanzará los 100°C, o un poco más. La adición de agua insuficiente en primera instancia, provocará el aumento y el alcance de temperaturas mayores, aunque se corre el riesgo de “quemar” la cal y luego “enfriarla” al añadir más agua fría antes de que termine el proceso. Esto produce partículas no miscibles, dejando el mortero “corto”. Si por el contrario se le agrega demasiada agua, o se arrojan las piedras de cal en un depósito de agua, se ahoga la cal, evitando que alcance la temperatura mínima necesaria de 100°C. Con ello se obtiene un mortero más débil, carente de poder de unión y tenacidad”* (2016) .

El procedimiento tradicional consiste en formar un anillo con tres partes de arena y en su interior colocar una parte de cal viva. Se añade una pequeña cantidad de agua y en cuanto comienza a reaccionar se tapa la cal con la arena formando un cono, para evitar que se escape el calor y el vapor. Cuando la cal ha alcanzado su máximo de temperatura se va añadiendo más agua y mezclando con la arena hasta obtener el mortero listo para ser empleado (Copsey 2015)(Fig.3.13-3.14). El mortero resultante puede emplearse inmediatamente, aún en estado caliente en trabajos de albañilería, o formar un montículo y dejarse reposar durante unos días (se recomienda dos semanas) para ser empleado en revestimientos, evitando así craqueladuras por la expansión de partículas de cal no hidratadas. El indicador clave para identificar este proceso bajo microscopio es la presencia, dentro del mortero endurecido, de unos caliches o inclusiones de cal pequeñas y angulosas, que frecuentemente contienen restos de roca y partículas sobrecocidas, infracocidas o sin hidratar (Frew *et.al* 2015, citado en Copsey 2015).



Fig. 3.13 Mezclado de la arena con la cal y agua, dejando que aumente la temperatura de la reacción. Fig.3.14 Destapado del montículo y adición de más agua para completar la elaboración del mortero.

Magaloni describe el testimonio recogido por la restauradora Frida Mateos de los trabajos acometidos en Chichen Itzá, durante los cuales un artesano local agregó el agua gomosa a la mezcla en seco de cal viva y arena. Con esta masa construyó un montículo y bruñó la superficie para cerrar los poros y evitar la evaporación. Tras dos semanas de reposo abrió la parte superior de éste para usar el mortero, conservado en forma de masa húmeda en el interior (Magaloni 2001:160). De la lectura literal de este testimonio se deduce que el método empleado por este artesano local fue el apagado por mezclado en caliente de los elementos constitutivos del mortero, mediante el cual se conseguiría un estuco con gran resistencia mecánica debido a la optimización del calor en el proceso.

Este método recuerda al que describe también Morris para la preparación del mortero. Para el cual explica que los expertos mayas utilizaban una parte de cal por tres de *Sascab* y los mezclaban en seco. A esta mezcla seca se añadía agua con el exudado de la corteza del Chucum (*Havardia Albicans*), y se dejaba reposar durante dos semanas antes de usar, remojándolo y mezclándolo una vez al día (Morris *et.al* 1931:224). La metodología empleada es análoga a la descrita por Magaloni, aunque en este caso la cal habría sido ya apagada por pudrición, como se describe en la página anterior (Morris *et.al* 1931: 223).

### 3.4.2 La adición del árido

Para la elaboración del mortero fresco es necesaria la adición de la carga, que aporta resistencia una vez endurecido. Las arenas calcíticas que se añadieron a estas pastas de cal tuvieron que añadirse junto a la cal viva antes de ser apagada, o bien a la cal ya apagada.

#### 3.4.2.1 Añadido a la cal apagada

En el caso de haberse apagado la cal previamente a la mezcla del mortero, el componente árido tuvo que ser añadido con posterioridad, mezclándose con el hidróxido de calcio. En este caso, el árido se mezcló bien con la cal en polvo, si esta había sido apagada por pudrición (exposición), o bien con la cal en pasta, si esta procedía de un apagado por inmersión. En ambos casos la proporción que presumiblemente fue empleada por lo general, para el uso en revestimientos, fue de 1:3 (cal-árido).

#### 3.4.2.2 Añadido a la cal viva

Como se comentó anteriormente, este sería el caso del apagado por mezclado en caliente, en el que la cal y la arena se mezclan en seco y la primera se va apagando por adición de agua en una cantidad justa. El calor de la mezcla permite a las partículas de árido una mejor unión con la cal. En este caso, aunque la relación inicial de los componentes es de 1:3 (cal-árido), la proporción final aproximada empleada en el mortero sería de 2:3, por la expansión de la cal al apagarse. Por lo tanto, esta forma de apagado y mezclado del mortero contaría con más cantidad de conglomerante que en las mezclas realizadas con cal apagada.

### 3.4.3 Aditivos

#### 3.4.3.1 Adición en el agua de apagado

La reacción de apagado de la cal produce un aumento de temperatura en el líquido, que unido a la alcalinidad del proceso seguramente provoca en la estructura de la goma su hidrólisis, es decir la separación de los azúcares constitutivos que procuran una mejor solubilidad de los óxidos de calcio y además una mejor integración del árido en el conjunto por efecto de las partículas de *Sascab* en la matriz de cal por efecto de la ebullición y movimiento (Magaloni 2001:161) (Fig.3.15). Además, el poder higroscópico de estas gomas, ayudan a retener agua dentro del mortero, haciendo más lenta la carbonatación y por lo tanto obteniendo un estuco más compacto y resistente. (Magaloni 1998: 54-55)



Fig. 3.15 Adición del fruto del Ramón (*Brosimum Alicastrum*) en el agua de apagado de la cal por inmersión. Método empleado en los trabajos de conservación en el sitio arqueológico de Naranjo, Petén.

#### 3.4.3.2 Adición del macerado en la mezcla del mortero

En aquellos morteros que fueron realizados con la cal apagada por pudrición, la adición de los exudados vegetales tuvo que haber sido en el agua de amasado del mortero. Este hecho implica una diferencia de proporción con respecto al anterior método de adición, ya que añadido en el agua del mortero se emplearía en torno a un volumen de agua (para 1 de cal y 3 de *Sascab*), mientras que añadido al agua de apagado de la cal se emplearía mayor cantidad de aditivo. Además supone una diferencia química ya que la reacción de hidrólisis de las gomas a causa del calor generado en el apagado, no se llevaría a cabo de este modo. Por lo tanto el efecto que estos aditivos vegetales ejercen sobre el resultado final del mortero, añadido en el apagado o después de éste, debería ser diferente. A pesar de esta observación, estudios experimentales realizados con anterioridad por varios investigadores en distintos proyectos de conservación, han observado siempre una mejora en las condiciones de plasticidad del mortero en estado fresco, así como un

incremento en el tiempo de secado por una mayor retención de agua. Estas dos características han sido observadas tanto si la cal ha sido apagada con el agua de los macerados, como si ha sido añadida tras el apagado en el agua del mortero (Véase Jáidar 2006:245-260).

### 3.4.4 Carbonatación

La carbonatación del mortero es el proceso por el cual éste endurece por reacción con el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), transformándose de nuevo en el carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ) que dio origen al ciclo, según la expresión:



Hidróxido de calcio + dióxido de carbono = Carbonato de calcio + agua + reacción exotérmica.

Una vez aplicado y trabajado el estuco, el  $\text{CO}_2$  atmosférico comienza a reaccionar con el hidróxido de calcio que conglomerará el conjunto del mortero. Según Rossell (2013), esta compleja fase se compone de dos procesos secuenciados y parcialmente simultáneos. Primero se produce la pérdida de las propiedades reológicas del mortero (disminución de la trabajabilidad y plasticidad, alcanzando cierto grado de rigidez), que se verá muy afectada por condiciones geométricas, climáticas y arquitectónicas, variando de entre horas a días dependiendo de la evaporación del agua del mortero. En la siguiente fase se produce el contacto del  $\text{CO}_2$  de la atmósfera con el hidróxido de calcio, llevándose a cabo las siguientes etapas (Lawrence 2006):

1. Difusión del gas  $\text{CO}_2$  a través de los poros del mortero.
2. Disolución del  $\text{CO}_2(\text{OH})_2$  en el agua intersticial:  $\text{Ca}(\text{OH})_2 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{OH}^-$
3. Disolución del  $\text{CO}_2$  en el agua intersticial:  $\text{CO}_2 + \text{OH}^- \leftrightarrow \text{HCO}_3^-$
4. Equilibrio químico del  $\text{CO}_2$  disuelto en el agua intersticial:  $\text{HCO}_3^- + \text{OH}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O}$
5. Precipitación del  $\text{CaCO}_3$ :  $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{CaCO}_3$

La formación del carbonato de calcio conlleva un aumento de la masa de un 35% y un incremento de cerca del 11% de volumen, que produce la disminución de la permeabilidad de la estructura, pero sin obturarla (Rossell 2013:71). El proceso de carbonatación no parece seguir un proceso continuo desde la capa externa hacia el interior, sino que la reacción se produce de manera discontinua, por la difusión de los reactivos a través de una fase coloidal que compone el líquido que rellena los poros e intersticios del mortero. De esta reacción resulta la precipitación periódica de calcita en forma de anillos, denominada patrón de Lisegang (Pocostaes 2015; Rossell 2013).

Dos factores muy importantes que afectan a la cinética de la carbonatación son la humedad relativa y la temperatura. Una humedad relativa alta (sobre 90%) llena los poros del mortero con agua, saturándolos y bloqueando el acceso de  $\text{CO}_2$  hasta el hidróxido de calcio, ya que la difusión de gases en un líquido es 10,000 veces más lenta que en el aire (Houst 1996, citado en Lawrence

2006). Asimismo una humedad relativa baja, de menos del 20% inhibirá la carbonatación ya que no hay suficiente agua en los poros para disolverse, ni el  $\text{CO}_2$  ni la portlandita (Lawrence 2006:38); formándose carbonato cálcico amorfo. La humedad relativa óptima oscila entre el 40 y 80%. Al aumentar la temperatura decrece la solubilidad del hidróxido de calcio; por lo que la temperatura óptima de carbonatación estaría en torno a los 20°C (Cazalla 2002:28).

También influye en el proceso de carbonatación la estructura porosa del material, ya que el  $\text{CO}_2$  se propaga a través de la ésta. Por ello, una alta porosidad conlleva una mejor circulación de aire. La composición, apagado y añejado de la cal también afecta al proceso de carbonatación. Una cal dolomítica presenta una carbonatación más lenta que una cal rica en hidróxido de calcio. Por otra parte, el tamaño de los cristales de portlandita tiene un impacto directo en la velocidad de carbonatación ya que los cristales más pequeños tienen mayor  $S_{\text{esp}}$ , y accederá el  $\text{CO}_2$  más rápidamente. Cuando están en solución, el tamaño de las partículas de muchos materiales cristalinos aumenta con la edad. Por ello algunos ensayos sobre maduración de cales en pasta, muestran que los cristales de portlandita experimentan una reducción significativa del tamaño de partícula (Rodríguez-Navarro *et.al* 1998; Cazalla *et.al* 2000; Hansen *et.al* 2000, citados en Lawrence 2006).

La presencia de aditivos orgánicos en las pastas de cal da lugar a que partículas esféricas de carbonato cálcico precipiten a partir de una fase acuosa como vaterita o aragonito. Por otra parte, la morfología cristalina puede ser controlada por la presencia de estas sustancias (Cazalla 2002:29).

### 3.5 Aplicación de los estucos

Sobre la manera en que los artesanos mayas aplicaron y trabajaron los morteros de cal, para convertirlos en resistentes estucos, se conoce escasa información. En el registro arqueológico, la presencia de herramientas relacionadas con este trabajo es poca, ya que lógicamente la mayoría de estos utensilios serían elaborados con materiales perecederos como la madera o las fibras vegetales con las que confeccionar llanas, espátulas, brochas, etc. Sin embargo se han hallado elementos pétreos clasificados como pulidores o *stucco smoothers*, generalmente realizados en piedra caliza o arenisca, cuya función pudo ser la de alisar o pulir el estuco de revestimiento (Torres 2014:132) (Fig.3.16). Para esta función, también pudieron haber sido empleados los frutos redondos y compactos del corozo (*Orbignyacohune*)<sup>17</sup>, o de alguna especie similar (Tezucún, H. 2013; comunicación personal).

En su tesis doctoral, Straulino L. (2015:42-44) recoge numeroso vocabulario relacionado con los procesos de manufactura de la cal, procedente de documentos coloniales<sup>18</sup>, que contribuyen al entendimiento de estos procesos, así como al conocimiento de algunas de las herramientas usuales empleadas durante la elaboración y la aplicación de estas pastas de cal.

<sup>17</sup> Información aportada por D. Haroldo Tezucún, trabajador en el Proyecto La Blanca y experto en el medio natural. Comunicación personal, campaña 2011.

<sup>18</sup> La autora emplea las fuentes: Cordemex 1980: Diccionario maya-español, español-maya. Dirigido por Alfredo Barrera Vázquez. Mérida. T. de Coto 1983: Thesaurus verbov: vocabulario de la lengua cakchiquel v (el) guatemalteca, nuevamente hecho y recopilado con sumo estudio, "travajo" y erudición. René Acuña, México UNAM. D. Bolles 2012: Combined Mayan-Spanish and Spanish-Mayan Vocabularies. Milford, Conneticut.





Fig. 3.16 Posible alisador o “smoother” de piedra para el pulido de los estucos. Museo comunitario de Oaxactún, Petén.

La persona que hacía la cal o “el que hace cal” se llamaba *ah took chuh kab* (Cordemex 1980:804, citado en Straulino 2015:42). Para los mayas yucatecos, algunas de sus herramientas eran *babche* “palos con los que revuelven la mezcla y cal” (Bolles 2012:161, citado en Straulino 2015:42). Algunas de las herramientas empleadas son la plana de albañil, a la que se refiere como *qhiqh naqbal chun* o *qhiqh yolbal ru vach chun u oqueçabal chun ch’u vach xan*. *Pahbal* es la “medida, instrumento con que se mide” (Coto 1980:339) y *tucbal* es “instrumento para *rreboluer* así algo (la mezcla)” (Coto 1980:467, citado en Straulino 2015:43).

Relacionadas con el proceso del bruñido de los revestimientos encontramos vocablos como *yulub* “bruñidor” (Bolles 2012:2344, citado en Straulino 2015:43). *Huch ah ub* se registró como “batanar, bruñir y golpear las mantas de tributo y bruñir el papel y lo encalado pasándole bruñidera por encima y alisar una piedra con otra y aplicar espada” (Bolles 2012:911, citado en Straulino 2015:43) *Yul* también se registra como “bruñir lo encalado y otras cosas” (Bolles 2012:2343, citado en Straulino 2015:43) y *yulmal* es “irse alisando como encalado cuando bruñen” (*ibíd.*:2344). *Hochtuntah* es “golpear lo encalado para que empareje y “bruñir el encalado cerrando las *enededuras* y grietas” (*ibíd.*:2072). El hecho de que los revestimientos eran bruñidos tras su aplicación queda constatado de nuevo por Fray Diego de Landa en el siglo XVI. En su obra encontramos una frase fundamental referente a este meticuloso trabajo ...“*Otros árboles de cuyas cortezas hacen los indios cubillos para sacar agua para sí, y otros de que hacen las sogas, y otros de cuyas cortezas majadas hacen un caldo para bruñir con él los encalados, y los hace muy fuertes*” (De Landa 2002: 188).

## 3.6 Técnicas artísticas asociadas al estuco

### 3.6.1 Pintura mural

En la cultura maya el color formó parte fundamental del lenguaje visual de las manifestaciones plásticas, ya que la mayoría de las construcciones arquitectónicas estaban pintadas. También los grandes mascarones, el alto y bajorrelieve, las esculturas, estelas, altares y la cerámica ritual se cubrían de policromía. Sin embargo hoy no son más que escasos vestigios los que sustentan esta teoría. Posiblemente el exterior de la mayoría de las grandes edificaciones de las ciudades mayas se pintaba de rojo y según las evidencias que aún se conservan, quizá en las fachadas hubo escenas, aunque como es lógico, la mayoría de las pinturas que se han preservado se encuentran en tumbas y en el interior de los cuartos. (Staines 2004).

A pesar de que son pocos los ejemplos de murales pintados que se conservan en el área maya, han sido objeto de estudio por numerosos investigadores. Así pues, de estos vestigios se ha podido determinar datos importantes como la cronología, estilo, temas, influencias, así como la técnica de ejecución, los pigmentos, o herramientas empleadas.

Entre el Preclásico Medio y el Preclásico Tardío los pigmentos que fueron empleados por los antiguos en sus pinturas murales estuvieron bastante limitados por las condiciones mineralógicas del área, basándose la mayoría de ellos en el entorno accesible; óxidos de hierro para el color rojo, ocre, anaranjados y marrones, cales y arcillas claras para los blancos y carbón vegetal para los negros. Se consta de la presencia de minerales de cobre como la malaquita y azurita, aunque éstos estuvieron limitados a regiones cercanas del centro de México.

A finales del Preclásico Tardío esta reducida gama de color se vio ampliada por la introducción de tonos azules, verdes y morados conseguidos de forma artificial. Los artistas mayas consiguieron transformar un colorante natural inestable en un pigmento apto para ser usado en pintura mural empleando cargas arcillosas en las que el colorante penetraba y a través de cuya cocción se obtenía un “panecillo” estable para moler y aglutinar sobre el estuco (Martínez *et.al* 2006).

Las Tierras Bajas Mayas fueron ricas en yacimientos en los que se formaron diferentes minerales de hierro que facilitaron la preparación de los tonos de rojos, los más empleados en la pintura. Los rojos más representativos empleados fueron la hematita, el ocre rojo y el cinabrio. La hematita es un óxido de hierro anhidro formado en el interior de cuevas y hormigueros de la selva. Fue con seguridad el color empleado para trazar el dibujo preparatorio y algunos autores apuntan que éste fue mezclado con mica. La hematita especular tiene una composición igual a la anterior, pero posee mayor resistencia y un brillo purpúreo debido a las altas temperaturas a las que cristaliza, con lo que debió formarse en entornos volcánicos como el Altiplano de Guatemala.

El sulfuro de mercurio o cinabrio, tuvo que ser transformado mediante la adición de azufre en un proceso muy complicado, para conseguir su estabilidad y poder ser empleado como pigmento. La ausencia de cinabrio en muchas zonas del área implica su importación y de ahí su coste y alto valor simbólico. Se encuentran muy pocos ejemplos en pintura mural y sí más en contextos funerarios asociados a la alta élite (Vázquez de Ágredos 2007: 58-60).



Para obtener los tonos rojos minerales, se procesaron las tierras rojas, *kancab*, mediante calor, consiguiendo distintas tonalidades de rojo más oscuras. Otro método de obtener pigmentos terrosos como los rojizos, marrones, ocre o negros era por flotación, construyendo pequeñas balsas en los ríos para la decantación de las arcillas. Para obtener pigmentos a base de colorantes tanto vegetales como animales, se procesaron tintes orgánicos como el achiote, el palo de brasil o cochinilla, precipitados en superficies inertes mediante el calor de la cocción. De este proceso se obtuvieron barras o “panecillos” que tras ser molidos y reducidos a un fino polvo en mortero de piedra, eran aglutinados para aplicarlos sobre el revestimiento de cal. Con seguridad estas barras de colores fueron objeto de rutas de comercio entre poblaciones por su facilidad en el transporte (Magaloni 2001).

En cuanto a la técnica pictórica, se conoce y así se ha confirmado en numerosas ocasiones por medio de análisis químicos, que los pigmentos, fuere cual fuere su origen, una vez preparados en finos polvos, eran mezclados con agua de cal en la que previamente se habían disuelto gomas vegetales, bien aprovechando el agua de hidratación y apagado de la cal viva, o bien con determinados extractos exclusivos para el aglutinado de los pigmentos.

En el Documento Anónimo de 1548 se describe el método de elaborar el aglutinante empleado para pintar sobre papel de corteza y se comenta que la “legumbre” (Hace referencia a los bulbos de la orquídea, *Bletia Campanulata*), era hervida, luego secada al sol y molida hasta obtener un polvo fino. También comenta que este polvo se calentaba y mezclaba con miel y resina de árbol. Aunque este método se refiere a la pintura para iluminación de manuscritos, es posible que de forma igual o similar se empleara para la pintura mural (Magaloni 2001).

El hecho de aplicar los pigmentos con un aglutinante que los fije a la superficie, hace que la técnica de ejecución sugiera ser al “seco”; pero es importante señalar que los estucos de cal, una vez aplicados, se mantienen frescos al tacto por un periodo relativamente largo de tiempo, y que la carbonatación del enlucido tarda semanas en producirse debido a la alta humedad relativa del área (Carrascosa *et.al* 2009). Si la aplicación del color para la decoración de los muros se efectuaba generalmente una vez terminados los enlucidos, cuando aún estaban frescos, es posible que parte del pigmento quedara integrado en la estructura calcítica de éste a modo de fresco. En tal caso y como apuntan algunos autores, estaríamos ante una técnica entre el fresco-seco.

Las estratigrafías correspondientes a muestras de color observadas a través del Microscopio Óptico, revelan que en La Blanca el pigmento fue aplicado en seco en todas las muestras estudiadas ya que se distingue perfectamente una línea de separación entre el enlucido y el estrato de color (Domenech y Vázquez de Ágredos 2006).

Por el contrario, encontramos que los numerosos estudios efectuados desde los años 40 del pasado siglo sobre las pinturas de Bonampak (Fig. 3.17), el mejor ejemplo de pintura mural hasta ahora descubierto que se conserva por completo, concluyen que la técnica de ejecución podría ser el fresco. A pesar de existir aglutinantes orgánicos en los estratos pictóricos, no se explica su supervivencia de no ser por emplear esta técnica. El hecho de no encontrar jornadas, característica de los frescos, atiende a una forma colectiva de trabajo (Magaloni 1998).



Fig. 3.17 Representación de danzantes tocando instrumentos. Bonampak (Chiapas).

En 2011 fue hallada una estancia repleta de pinturas murales en el asentamiento maya de Chilonché, Petén, Guatemala; cuyos estudios realizados mediante pirólisis con cromatografía de gases-espectrometría de masas (Pyr-GC/MS) y cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC), revelan que dichas pinturas fueron ejecutadas mediante la técnica del fresco. Esta conclusión ha sido determinada debido a la ausencia de aglutinantes orgánicos en las muestras estudiadas, por la ejecución rápida de las pinceladas y por el empleo de una paleta cromática constituida por pigmentos compatibles con esta técnica (Vázquez de Ágredos *et. al* 2014).

### 3.6.2 Grafitos

El término grafito, deriva del italiano *graffiare* que quiere decir “arañar” o “rascar” (Herbert 2009: 14). Este vocablo ha sido adaptado al español, siendo ya un término ampliamente extendido y empleado en el área maya. Los grafitos se presentan de forma general incisos sobre los estucos que recubren el interior de las estancias, si bien se han registrado también en los escasos restos de estuco que se han conservado en fachadas.

Con la cada vez más creciente realización de proyectos arqueológicos en zonas mayas, es obvio el descubrimiento de los numerosos dibujos incisos o grafitos que sus autores realizaron sobre el estuco de los muros, en algún momento determinado de su ocupación o paso por las edificaciones mayas, y que cientos de años después, resurgen de nuevo a la luz, tras un prolongado letargo de sepultura.

En el siglo XIX, fueron documentados los primeros grafitos por el artista Eusebio Lara, quien formaba parte de la expedición liderada por el corregidor del Petén, el Coronel Modesto Méndez, a quien se le atribuye el redescubrimiento de Tikal en 1848. Este artista realizó los primeros dibujos de estelas, dinteles y otros paramentos tallados, así como un templo piramidal que tituló “Palacio nº1”, representando los grafitos que en él se hallaban. Posteriormente en el siglo XX, gracias a los grafitos realizados en este dibujo se pudo identificar este templo, actualmente conocido como Templo V (Vidal y Muñoz 2009).

A principios de siglo XX, otros exploradores como Teobert Maler, Maurice de Périgny o Alfred Tozzer, descubrieron e investigaron los primeros sitios arqueológicos. Teobert Maler registró de forma más precisa los grafitos de Tikal, especialmente los del Templo conocido como Palacio Maler. En 1983 y como única excepción, se publicó el Tikal Report 31, que recogía el conjunto de grafitos de esta ciudad, dándoles así importancia a estas manifestaciones que seguidamente caerían en el olvido; llegándose a deteriorar gravemente e incluso en muchos casos a desaparecer, dejando, como única evidencia esta primera documentación gráfica.

Desde entonces, estas expresiones no han sido reconocidas como arte oficial, y por lo tanto no han sido considerados ni incluidas en la misma categoría que la escultura, ornamentaciones arquitectónicas o pinturas murales, restándole a menudo importancia, y dejándolos desaparecer bajo las duras condiciones climáticas del área maya. Si bien estas manifestaciones no pueden equipararse con el resto de facturas artísticas, ya que su presencia no parece ser fruto de un estudio, preparación e intencionalidad decorativa y narrativa como lo es el arte oficial, sí es cierto que la gran cantidad de grafitos registrados entre los numerosos sitios arqueológicos investigados, forman un gran corpus, suficiente para merecer su atención. Aunque estos grafitos no presenten la calidad o destreza técnica y artística de las ornamentaciones murales o arquitectónicas, suponen una importante fuente de documentación acerca de las costumbres o actividades de la cultura maya, pudiéndose clasificar en numerosos temas o categorías representativos de la vida, pensamientos y religión de sus habitantes; desde representaciones de animales comunes, personajes, músicos, viviendas o escenas de caza, hasta representaciones de ofrendantes y gobernadores, actos propagandísticos o seres sobrenaturales (Fig.3.18).



Fig. 3.18 Grafito inciso que representa a un venado; ubicado en el muro Este de 6J2-4. Sitio arqueológico La Blanca.

Estos grafitos incisos en el estuco, deben su conservación a la perdurabilidad del soporte en el cual se realizaron y sobre todo a la protección que en la mayoría de los casos ha supuesto el ser cubiertos por el derrumbe de las estancias, logrando conservarse en mayor medida que las pinturas murales, cuya técnica de ejecución al seco, basada en el empleo de temple vegetales de orígenes diversos (Vázquez de Ágredos 2007), ha sucumbido al tiempo y a las duras condiciones climáticas, dejando a día de hoy escasos vestigios. Pero la realidad es que pocas han sido las investigaciones sobre estas manifestaciones y escasa es la información que de ellos se conoce, además de la controversia existente entre diferentes teorías acerca de la intencionalidad, o la autoría de estos grafitos.

En cuanto al momento de ejecución, la existencia, por ejemplo, de al menos dos estilos de grafitos, en la micro-región de Río Bec, Campeche, apunta a que al menos hubo dos momentos o épocas de ejecución principales. Los trazos más delicados y de mayor calidad artística se realizarían durante la ocupación inicial del sitio y en la mayoría de los casos coinciden con su ubicación en medidas accesibles para la persona, entre 0,30 m y 1,60 m. de altura en el estuco original de las estancias. A partir de esta altura no aparecen grafitos hasta llegar a los 2 m. de altura, donde vuelven a aparecer, coincidiendo con la parte superior de la línea de escombros. Lo que quiere decir que estos últimos grafitos, serían realizados tras el abandono del sitio, cuando las estancias habían sido colapsadas, siendo normalmente más sencillos, esquemáticos, rígidos y profundamente incisos en el estuco (Patrois y Nondédéo 2009).

Referente a la autoría de estos dibujos incisos, son varias las teorías que se han publicado. Tozzer, en 1913 propuso considerarlos como el testimonio de visitantes precolombinos a las ciudades mayas, sin ser necesariamente contemporáneos a la época de ocupación primera. Esta teoría la siguió Kampen en 1978, quien basándose en el caso de Tikal propuso que estos grafitos eran el resultado de actos de profanación en edificios preclásicos o clásicos, cuando éstos ya habían sido abandonados por sus habitantes originales. Contrariamente, Webster, opina que estos grafitos fueron realizados por los propios habitantes de los edificios desde el Preclásico hasta el Clásico, como una forma de retratos individualizados. De forma parecida, George Andrews en 1999, percibe estas manifestaciones como un tipo de arte popular, cuyos autores fueron los mismos miembros de la élite que habitaban los edificios, con el deseo de memorizar personajes, objetos o actos importantes en la vida de la élite. De modo muy dispar a las demás, William Haviland y Anita de Laguna Haviland, en 1995, consideran que los grafitos, en especial los de Tikal, fueron el resultado de varias etapas de trance por parte de los miembros de la élite, donde se representaron las formas geométricas, luminosas e imágenes icónicas de personas, animales y seres sobrenaturales que aparecen durante los distintos estados alterados de consciencia (Zralka y Hermes 2009).

Recientemente, otros investigadores han publicado nuevas ideas sobre la autoría de estos grafitos. En el caso de La Blanca, la calidad del trazado y la forma de resolver el esquema compositivo de algunos de sus grafitos, como es el caso de una de las escenas más importantes aparecida en el Palacio 6j1, corresponde a la destreza de un artista experto (Vidal y Muñoz 2009). Mientras por el contrario, otros autores se inclinan hacia la idea de que estos dibujos incisos sobre los estucos que revisten los muros de las estancias, no estaban restringidos a verdaderos especialistas, como es el caso de la pintura mural, sino que su ejecución estuvo permitida a todos los miembros de la familia habitante de la vivienda, como un modo de expresión libre y espontánea de decorar sus casas (Patrois y Nondédéo 2009). En el otro extremo, pero igualmente posible, se compara la ejecución de estos grafitos con las “pintadas” en los edificios de las modernas urbes, como un modo de exteriorizar su personalidad (Rivera 2009).



# CAPÍTULO 4

## APROXIMACIÓN AL LUGAR DE ESTUDIO

## 4.1 El sitio arqueológico La Blanca

La primera referencia que se tiene del descubrimiento contemporáneo de La Blanca data de 1905, cuando Teobert Maler, uno de los primeros exploradores de la zona de Petén, denominó a este sitio “El castillito”, sin duda debido a la monumental arquitectura visible. Más tarde, en 1913, las expediciones del Museo Peabody de la Universidad de Harvard, estudiaron y documentaron en profundidad el sitio, denominándolo *Chac-Ha*, y realizando las primeras fotografías (Muñoz 2006a). Más recientemente, La Blanca se incluyó en la lista de sitios con arquitectura visible y en peligro, elaborada por el Proyecto Triángulo Yax-Hà-Nakum-Naranjo del Ministerio de Cultura y Deportes de Guatemala, en un proceso de rescate y puesta en valor (Vidal y Muñoz 2013:94; Quintana y Wurster 2001, citado en Muñoz 2006a).

Desde esta perspectiva histórica, es evidente el interés que este lugar ha despertado en numerosos exploradores e investigadores de la cultura maya desde comienzos del pasado siglo XX. Su imponente y singular arquitectura habla por sí sola y revela el significativo papel que desempeñó en torno a actividades comerciales y administrativas, en su periodo de máximo esplendor.

### 4.1.1 Contexto histórico y temporal

Como se describió anteriormente, el comienzo de la colonización en territorio mesoamericano tiene su origen después del año 5000 a.n.e con el inicio de la agricultura que provocó el arraigamiento de las poblaciones y el comienzo del sedentarismo. Alrededor del segundo milenio a.n.e, los pequeños grupos eran moradores de aldeas, como se deduce de las plataformas ovales de estuco halladas en Cuello, Belice, fechadas hacia el 2500 a.n.e (Hammond 1988), y que corresponden a bases donde se asentaban las estructuras de madera que formaban las viviendas, distribuidas en torno a patios estucados.

En términos generales, la cronología de la cultura maya, se clasifica en tres grandes periodos. El Preclásico (1200-300 a.n.e), el Clásico (300-1000 n.e) y Postclásico (1000-1521 n.e) (Fig. 3.2, pág. 55). Si bien hace un tiempo el periodo preclásico se creía de carácter arcaico y formativo, no cabe duda de que en realidad fue un periodo de esplendor y apogeo de algunas ciudades como El Mirador, en Petén, ocupada desde el Preclásico medio (900-300 a.n.e), cuyas enormes y complejas construcciones, decoradas con relieves de estuco de grandes dimensiones, son un excelente ejemplo. Durante el periodo Clásico, continúa el apogeo de distintas ciudades como Tikal, que junto a Calakmul fueron las dos grandes potencias que gobernaron la región maya. La situación política de este periodo, así como otros datos culturales de la época, han podido ser reconstruidos gracias a numerosas representaciones jeroglíficas en estelas, murales o cerámica y al desciframiento de la escritura maya (Grube 2000:15).

A finales del periodo Clásico (Clásico terminal, 800-1000 n.e), la cultura maya comienza a mostrar signos de un inminente desmoronamiento. Durante los siglos IX y X, las grandes ciudades de Petén fueron abandonadas por sus habitantes, desplazándose el foco de la actividad hacia el Norte, a ciudades como Chichen Itzá o Uxmal. Estas ciudades centrales abandonadas, fueron parcialmente reocupadas por otros habitantes en el periodo Postclásico (1000-1521 n.e). En



1521, con la caída de la ciudad de Tenochtitlán, se inicia la conquista y caída de los pueblos mayas y el inicio de la era colonial; aunque cabe destacar que la desaparición del mundo maya no fue inmediato ni simultáneo en todo el territorio, habiendo zonas de resistencia como los mayas itzaj de la capital Noj Petén, que no sucumbió hasta 1697.

El asentamiento maya de La Blanca cuenta con una cronología de ocupación variada, que se sucede desde el Clásico Temprano (250-600 n.e)<sup>1</sup> hasta el Postclásico Temprano (1000-1250 n.e). La época de mayor esplendor del sitio se sitúa en el periodo Clásico Tardío (600-850 n.e), siendo esta la etapa de construcción de los edificios más representativos y majestuosos de la Acrópolis (Fig.4.1).



Fig. 4.1 Esquina NO de la Acrópolis de La Blanca, elevada sobre un gran basamento. A la derecha se observa, en un nivel inferior, el acceso a la subestructura, de época más temprana.

Así pues, se cree la hipótesis de que La Blanca pudo haber sido ocupada y abandonada en tres periodos diferentes. El primero, a finales del Clásico Terminal (850-1000 n.e), con la huida de los nobles residentes en la Acrópolis, como consecuencia de la inestabilidad política y económica de la época. En este momento se cree que otros habitantes pudieron ocupar estas estancias a modo de viviendas, durante un breve periodo de tiempo por las evidencias arqueológicas halladas como enterramientos no rituales (no pertenecientes a clase noble), o cerámica en contexto de basurero.

En el Postclásico Temprano (1000-1250 n.e) se produce la tercera y última ocupación de La Blanca, momento en el que la notable arquitectura ya habría colapsado en parte, como demuestra el enterramiento 1, hallado en el nivel de derrumbe del cuarto 6J2-3.

<sup>1</sup> Fueron documentados niveles de ocupación de este periodo en el grupo sur de La Blanca, donde se encuentran las únicas construcciones de carácter ceremonial (Vidal y Muñoz 2014:95).

### 4.1.2 Contexto geográfico

El territorio en el que se desarrolló la cultura maya abarca los actuales países de Guatemala, Belice, El Salvador, parte de Honduras y los estados mexicanos de Chiapas, Campeche, Tabasco y Quintana Roo. Debido a las diferenciaciones geográficas de esta amplia zona mesoamericana, especialmente condicionada por las precipitaciones y las características de los suelos, este espacio se encuentra dividido en tres regiones correspondientes a la llanura litoral del pacífico, las Tierras Altas mayas, y las Tierras Bajas mayas, núcleo principal del desarrollo de esta cultura, y área en la que se ubica el sitio arqueológico objeto de este estudio.

Las Tierras Bajas mayas ocupan una extensión aproximada de 250.000km<sup>2</sup>, siendo una meseta calcárea sedimentaria y casi llana (Grübe 2000:24). Presenta elevaciones promedio de 100m, formadas por sedimentos mesozoicos y Terciarios, levemente plegados sobre calizas y dolomías cretácicas, donde se desarrolló un relieve cárstico, dando lugar a un terreno muy accidentado (Herrera 2005)(Fig.4.2). Una de las características principales de los suelos de las Tierras Bajas es su permeabilidad, que provoca que el agua de la superficie, procedente de las lluvias, se filtre inmediatamente al subsuelo poroso. La capa de tierra que forma el suelo es extremadamente delgada y decrece conforme se avanza hacia el norte de la península de Yucatán, donde puede llegar a tener menos de 50 cm de espesor (Grübe 2000:24).

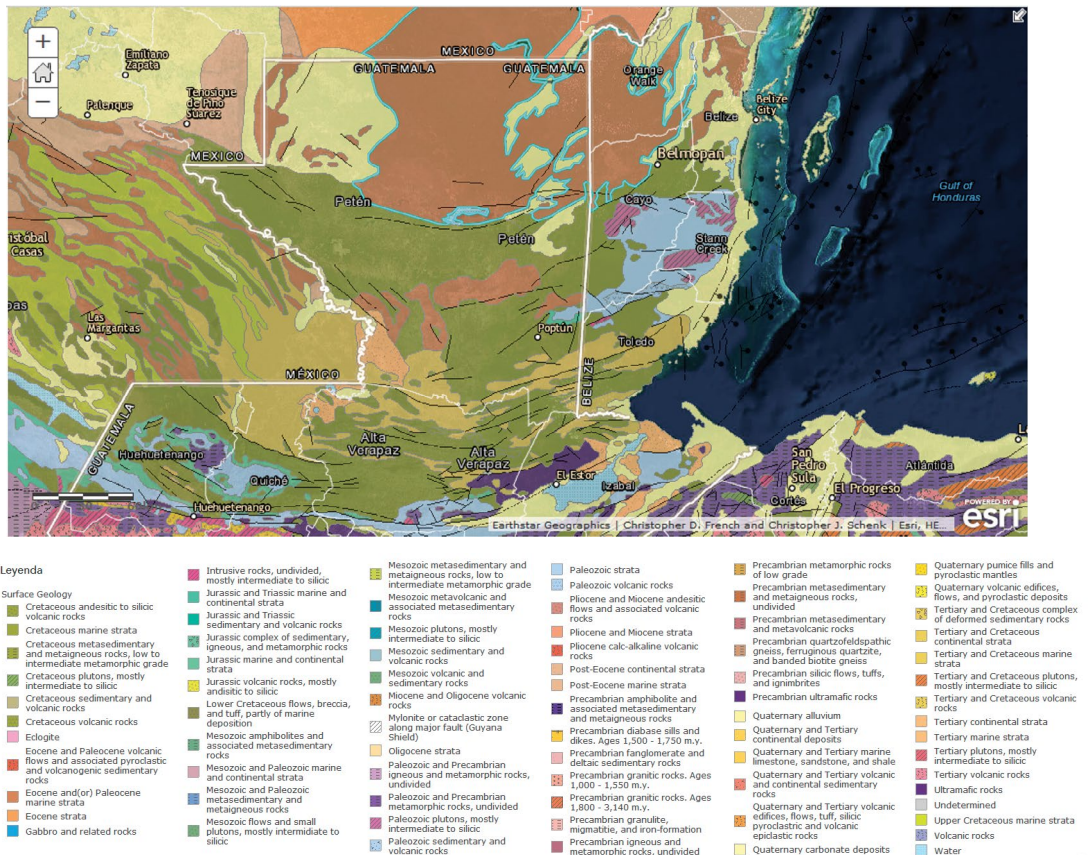


Fig.4.2 Superficie geológica de las Tierras Bajas mayas con indicación del área de asentamiento de La Blanca, correspondiente a estratos terciarios y cretácicos de formación marina. Fuente <http://www.arcgis.com> (consulta 30/12/2016).

En el sureste de Petén se conjugan varias divisiones geográficas formadas por planicies fluviales, llanuras interiores y por las Montañas Mayas, en sus vertientes oeste y norte (Laporte 1996). La topografía es plana, aunque en algunas partes, existen cerros y colinas de forma redondeada como producto de la erosión diferencial, que sobresalen, con orientación hacia el suroeste, al igual que los ríos que atraviesan la región (MAGA 2001:84). El área que rodea La Blanca, se describe fisiográficamente como una planicie aluvial, de formación cuaternaria (*ibid.*), correspondiente al valle del río Mopán, con topografía plana y suelos arcillosos neutros y ligeramente alcalinos (Rodríguez 2007) (Fig.4.3).

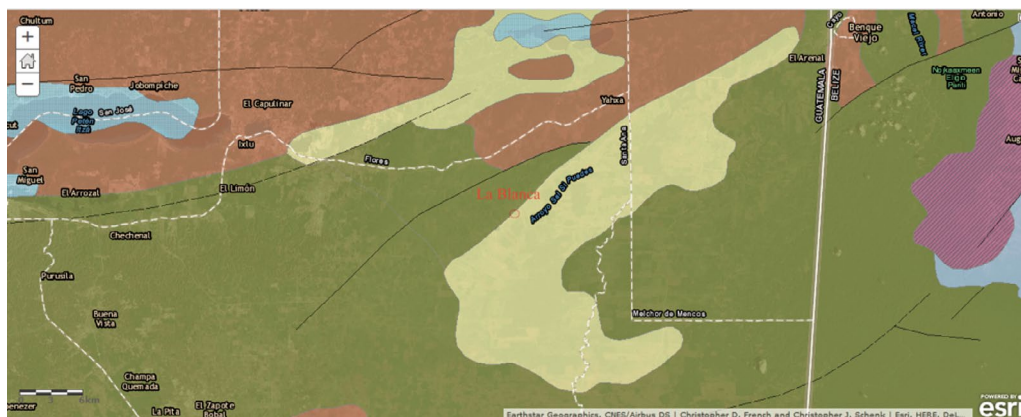


Fig. 4.3 Geología circundante al sitio arqueológico La Blanca. Fuente <http://www.arcgis.com> (consulta 30/12/2016).

#### 4.1.2.1. Clima

El clima tropical húmedo, como parte del clima ecuatorial, se caracteriza por ser cálido y tener elevadas precipitaciones. Las temperaturas son de forma general muy elevadas durante todo el año y con poca oscilación térmica. Los meses más cálidos corresponden a marzo, abril y mayo, caracterizados por ser secos y con cielos despejados. En las Tierras Bajas tropicales, las temperaturas diurnas se comprenden entre los 29 y los 32°C y las nocturnas entre los 20 y los 24°C; registrándose mayor diferencia entre el día y la noche que entre las distintas estaciones, razón por la que se suele decir que la noche es el invierno de los trópicos (Grübe 2000:22).

Este clima también se caracteriza por tener una estación seca y una estación lluviosa, haciéndose coincidir esta última con la posición alta del sol en verano. Esta temporada de lluvias se interrumpe a principios de agosto con la canícula<sup>2</sup> y se reanuda de nuevo en septiembre, dándose por concluida la estación de lluvias en octubre, en las Tierras Altas, y en diciembre en las Tierras Bajas. La geografía también condiciona las lluvias, ya que las menores precipitaciones registradas se dan al noroeste de la península de Yucatán, y éstas se van intensificando conforme se avanza hacia el sur, llegándose a registrar más de 4.000mm en la región de Palenque, Chiapas (*ibid.*:21).

<sup>2</sup> Período de sequía en la temporada lluviosa (RAE 2016)



#### 4.1.2.2 Vegetación

En las Tierras Bajas Mayas, especialmente en las del sur, predomina una espesa selva tropical de gran diversidad, pudiéndose encontrar en una extensión de aproximadamente una hectárea, más de 150 especies arbóreas distintas (*ibíd.*:23). Esta vegetación genera un paisaje llamado la *pluvisilva*, que se caracteriza por varios estratos de árboles, de los cuales los más altos forman bóvedas que impiden a los rayos solares llegar hasta el suelo. Es por ello que apenas existe vegetación baja ni gramínea en el suelo, que se encuentra continuamente cubierto por una gruesa capa de hojas en descomposición.



Fig. 4.4 Vista aérea actual de las ruinas de La Blanca junto al camino de tierra que conduce a la aldea del mismo nombre. En la segunda imagen (zoom), se aprecia el reducho de selva en el que se encuentran sumergidas las ruinas. Fuente <http://www.arcgis.com> (consulta 30/12/2016).

Por su ubicación en la parte baja del valle del río Mopán; los alrededores de La Blanca se ven inundados estacionariamente a causa de las crecidas de dicho río. Su proximidad al río Salsipuedes (afluente del Mopán) y a la laguna de La Blanca, lo convierten en un lugar privilegiado de acceso al agua, que debió ser determinante para los habitantes del sitio en su época de esplendor (Vidal

2006) y que de seguro propició una tierra fértil y desbordada de vegetación, así como cultivos abundantes. En la actualidad, Las ruinas de La Blanca se hallan en un pequeño reducto de selva que las protege, y que sobresale en medio de los cada vez más deforestados campos, empleados en la actualidad para la explotación ganadera y la agricultura (Fig.4.4).

En 2006, Mario Rodríguez Lara (2007) realizó un exhaustivo estudio de la vegetación circundante al área arqueológica de La Blanca para determinar y cartografiar los diferentes estadios de la vegetación. En este estudio se distribuye la vegetación en cuatro estratos correspondientes a: bosque residual, bosque secundario, guamil bajo y zona agrícola.

El bosque residual cuenta con una altura media de 22 m y una densidad de 190 árboles por ha, distinguiéndose 57 especies entre las que se encuentra el Ramón (*Brosimum Alicastrum*) el Guarumo (*Guazuma ulmifolia*), el Jobo (*Spondias Bombin*) o el Chacaj (*Bursera Simaruba*). El estrato de bosque secundario se compone por especies arbóreas de regeneración y arbustivas, con una altura de 18 m y una superficie de 4 ha. Entre las especies más abundantes destacan el Guarumo (*Guazuma ulmifolia*), el Cedro (*Cedrela odorata*), el Laurel (*Cordia gerascanthus*) o el Jabín (*Psidia Piscipula*). El estrato correspondiente al Guamil (barbecho), se compone fundamentalmente de especies arbustivas, herbáceas y gramíneas crecientes. El estrato de uso agrícola se destina a la explotación de cultivos tradicionales como el maíz y a pastos controlados (*ibid*::122).

Actualmente, La Blanca pertenece al municipio de Melchor de Mencos, se localiza en la frontera entre las regiones del noreste y sureste del departamento de Petén (Vidal 2007:790), muy cerca de la frontera con Belice. Se accede a través del camino de tierra que parte de la carretera que va de Flores a Melchor de Mencos, a la altura de la población de La Pólvara. Tras 17 km se encuentra el sitio arqueológico y a 3km de éste, se localiza la aldea con el mismo nombre que se asienta a ambos lados de la laguna homónima.

### 4.1.3 Contexto cultural

#### 4.1.3.1 Descripción de la zona arqueológica estudiada

Las ruinas de La Blanca, abarcan una extensión de 26ha (Muñoz 2006a), incluyendo los conjuntos arquitectónicos y basamentos visibles, si bien en su época de esplendor pudo haber contado con construcciones vernáculas de materiales perecederos dispuestas alrededor de estos centros palaciegos, sobretodo en el área oeste; con lo que su extensión territorial pudo haber sido significativamente mayor.

Su trazado urbano se puede ordenar en tres ejes paralelos con orientación norte-sur, siendo el primero (este) el que integra la arquitectura más destacada que abarca la gran Plaza Norte, la Acrópolis, la Aguada y el Grupo Sur; el eje central, que sigue el trayecto de la calzada, y un tercer eje (oeste), que agrupa las plazas situadas al oeste de la calzada, zona de gran ocupación por la cantidad de pequeños montículos y plataformas registradas (Muñoz 2006a:344) (Fig. 4.5).

La proximidad del río Salsipuedes, a unos escasos 1000m del Grupo Sur, sugiere la posible funcionalidad de éste como medio de transporte que facilitara la comunicación comercial. De ello se deduce que una de las principales entradas a La Blanca fuera por este sector Sur; conjunto que además cuenta con la datación más temprana del sitio (Clásico Temprano 250-600 n.e) (Muñoz y Vidal 2014:38). Este grupo está constituido por las estructuras 10L1-19L2 y 10L3 y 9K1; de las cuales, 10L1 y 10J2 corresponden a dos templos gemelos cuya fachada principal se orienta al oeste.

De este conjunto meridional parte la calzada o *sacbé*<sup>3</sup> hacia los complejos del norte. Esta calzada tuvo una anchura de 35m y un recorrido en torno a 250m. Al este de la calzada, entre el Grupo Sur y la Acrópolis se halla una depresión en el terreno de cerca de 3000m<sup>2</sup>, identificada como la aguada, que sirvió para recolectar y almacenar el agua de lluvia, gracias a su recubrimiento de estuco.

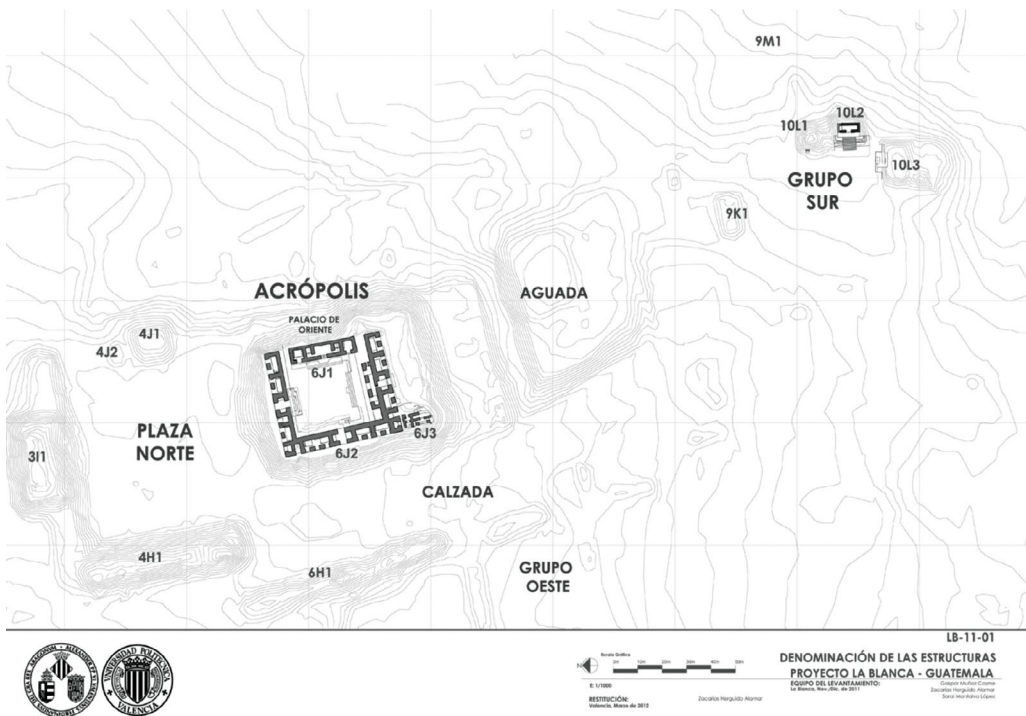


Fig. 4.5 Estructuras principales que componen La Blanca. Fuente: Proyecto La Blanca, Equipo de levantamiento Muñoz, G., Herguido, Z. y Montalvo, S. 2012.

El Grupo Oeste, ubicado a esta parte de la calzada es un conjunto residencial y de producción artesanal, dispuesto en torno a grandes plazas que se suceden a distinto nivel, flanqueadas por basamentos donde se ubicarían construcciones percederas (Muñoz y Vidal 2014).

<sup>3</sup> *Sacbé* deriva de la voz maya *sac* "blanco" y *bé* "camino"; eran caminos elevados construidos con piedras y pavimentados mediante gruesas capas de estuco; que conectaban varios centros de una misma urbe o unas ciudades con otras.

La gran Plaza Norte, de planta cuadrada, está formada por las estructuras 3H1 en el extremo septentrional, que conecta con la plataforma 4H1 en el sector más occidental de la plaza, cerrando esta esquina. En el área oriental, se encuentran los basamentos 4J1 y 4J2. Esta enorme plaza de 70m de lado (Muñoz 2006:343) cuenta con una superficie de 5.000m<sup>2</sup> y se cree que pudo haber albergado a 6000 personas (Muñoz, Vidal y Peiró 2010:382).

El sur de la Plaza Norte se cierra con la Acrópolis por su sector norte. Esta Acrópolis fue construida sobre un basamento que a su vez se erigió sobre estructuras arquitectónicas de un periodo anterior, lo que se conoce en área maya como subestructuras, por encontrarse por debajo de la arquitectura visible. De tipología palaciega, se distingue por su singular arquitectura, centrada en la privacidad de la plaza interior, que forman sus dos edificios (6J1 y 6J2).

#### 4.1.3.2 La Acrópolis. Arquitectura y funcionalidad de los edificios

Como se apuntó en el anterior capítulo, la arquitectura maya destaca por sus técnicas constructivas monumentales y sofisticadas en los periodos de máximo esplendor. De toda la trama urbana, el conjunto arquitectónico más destacado es generalmente la Acrópolis<sup>4</sup>, dada la magnitud y calidad constructiva, como reflejo del poder de los nobles que en ella residieron.

Este es también el caso de La Blanca. El proceso de excavaciones arqueológicas llevado a cabo desde 2004, ha sacado a la luz la totalidad de estos edificios (la mayoría de ellos con las bóvedas colapsadas), lo que ha permitido su estudio arquitectónico y compositivo, así como la deducción de las fases constructivas que se acontecieron en el levantamiento de este conjunto.

Los estudios que se presentan en esta tesis se han centrado en los revestimientos de estuco hallados en esta Acrópolis, dado que es el área con más arquitectura y estuco conservado, y por contar con más de 10 años de exposición, desde que se comenzara la excavación del primer cuarto; lo que ha permitido el seguimiento continuo de su estado de conservación. A continuación se describen, en síntesis, los rasgos formales y funcionales de dichos edificios.

##### *A la este*

Esta zona de la Acrópolis comenzó a ser liberada del derrumbe en la campaña de trabajo 2006. Esta edificación, independiente del resto de las estructuras, ha sido denominada por el proyecto como Palacio de Oriente.

Se trata de una construcción compuesta por un total de 5 estancias. La sala central con un único vano de acceso desde la plaza interior, es un gran espacio de 7,20 m de largo por 4,10m de ancho, con una altura estimada de 6m. Cuenta con dos aperturas particulares hacia dos estancias laterales de menor tamaño. En los extremos norte y sur del edificio, se encuentran otras dos estancias independientes que cuentan con su propio vano de acceso, también en la fachada oeste, que si bien son más pequeños que el de la estancia central, poseen dimensiones superiores a las habituales.

<sup>4</sup> Según la RAE (2016), acrópolis significa “parte más alta de una ciudad”. Aunque el origen de la palabra es griego (ἀκρόπολις), este término se ha empleado en área maya para definir esta zona de las ciudades debido a su asentamiento sobre plataformas, y por ello, a una mayor elevación del resto de edificios de la ciudad.

La composición y la situación de este singular edificio, sin acceso desde ninguna otra estancia de la Acrópolis, muestra la elevada privacidad para la que fue diseñado, y hace suponer que debió ser el palacio principal, reservado a las audiencias y recepciones del gobernante (Muñoz, 2007:23). Según los estudios realizados por Cristina Vidal y Gaspar Muñoz (2013), directores del Proyecto, por sus enormes proporciones y por hallarse aislado de 6J2, este edificio tuvo que ser el primero en construirse sobre la plataforma inicial (que alberga una subestructura anterior) (Fig. 4.6).

Con motivo de una remodelación para dotar de mayor privacidad al solitario Palacio de Oriente, las alas norte y sur de la Acrópolis fueron construidas dentro del mismo periodo (Clásico Tardío), confinando y definiendo la plaza central de la Acrópolis. Ambos edificios cuentan con una longitud total de 42m y 7m ancho (Vidal y Muñoz 2013:96).



Fig. 4.6 Fachada interior del ala este de la Acrópolis donde se aprecian los tres vanos de entrada a las estancias 1, 3 y 5, y acceso privado del cuarto 3 al 2, cubierto todavía con parte de su bóveda original.

### *Ala sur*

Entre las campañas de 2005 y 2008, la arquitectura del ala sur fue liberada, descubriéndose finalmente un total de seis cuartos de tamaños diferenciados. Estas estancias corresponden a tres tipologías<sup>5</sup> diferentes que pudieron atender a su funcionalidad, sus características constructivas y a su posición compositiva en el edificio. El primer tipo, denominado tipo A, corresponde a los cuartos 1, 2 y 4. Presentan dos puertas de acceso simétricas, separadas por un machón central. En su interior una gran banqueta de 0,75 m de altura, con apoyos laterales, ocupa la estancia. Sus grandes dimensiones, con una altura libre interior de 6,70m y una anchura de 2,95m, para poseer bóveda de aproximación<sup>6</sup>, hacen de esta tipología de estancia algo poco habitual en las construcciones de Petén (Muñoz 2006b: 30-31).

<sup>5</sup> Denominadas por el Proyecto La Blanca como tipos A, B, C y D. Para mayor información de las tipologías constructivas en La Blanca véase Muñoz 2005, Muñoz 2006b, Muñoz 2007.

<sup>6</sup> Forma primitiva de bóveda, obtenida por aproximación sucesiva de hiladas de sillares y no por encaje de dovelas, por lo que no funciona como una estructura abovedada, sino que provoca empujes verticales.



El tipo B corresponde al cuarto 5 y 6, y se tratan de cuartos con bóvedas de lados equivalentes, (Muñoz 2005:29-31) donde los lados perpendiculares a la puerta son mayores, actuando los cuatro lados de forma similar estructuralmente como en una bóveda de aproximación (Muñoz 2006b:32). Estos cuartos presentan una sola puerta de entrada, y parecen haber sido empleados en La Blanca para resolver las construcciones de esquina.

El cuarto 3 corresponde a la tipología C. Este cuarto se halla en el centro de la fachada, presentando una puerta de acceso en ambos muros longitudinales, que es de mayores dimensiones que las puertas de las tipologías A y B; atravesando ambos accesos se llega hasta la plaza central de la Acrópolis (Muñoz, 2006b:33) (Fig. 4.7).



Fig. 4.7 fachada exterior del ala sur de la Acrópolis donde se observan los vanos de entrada a los distintos cuartos.

### *Ala norte*

Se trata de la estructura que cierra la plaza central de la Acrópolis por su lado norte. En 2009, se comenzó con la excavación del cuarto central de esta estructura, para continuar en 2010 con el resto de las estancias. Finalmente se exhumaron un total de seis habitaciones denominadas 6J2-13, 14, 15, 16, 17 y 18.

El cuarto central (16) se corresponde con la tipología C del ala oeste y sur, con presencia de dos accesos paralelos, en ambos muros longitudinales, que dan acceso tanto a la plaza central de la Acrópolis como a la gran Plaza Norte. El cuarto 13 repite la misma solución que el anterior cuarto 6, con un único vano de acceso y con presencia también de parte de su bóveda original.



Fig. 4.8 Cuarto 6J2-17 del ala norte de la Acrópolis, orientado hacia la Plaza Norte.

El cuarto 14 presenta dos vanos de entrada con un machón intermedio, banqueta y apoyo en el lateral Este; mientras que el cuarto 15, presenta una única puerta y una pequeña banqueta. Entre ambos, se evidencian restos de un muro estrecho que los divide, por lo que se deduce que pudieron haberse erigido en un principio como una sola estancia de tipología D. En cuanto a los cuartos 17 y 18, son de tipología A con dos vanos de acceso y un mechón intermedio y su correspondiente banqueta con apoyos laterales asimétricos (Fig. 4.8). La fachada resultante constaría de nuevo de un acceso central más grande (6J2-16) y cuatro vanos de entrada, de menores dimensiones, situados simétricamente a cada lado.

Posteriormente a la construcción de las alas norte y sur, pero aún dentro del periodo Clásico Tardío, la Acrópolis sufrió otra remodelación restringiendo en mayor medida el acceso hacia el Palacio Oriental. Por ello se construyó un gran edificio en el ala oeste, de 48m de longitud, para lo cual se tuvieron que modificar los cuartos 6 y 13, para poder continuar el ritmo y la simetría de las fachadas.

### *Ala oeste*

Las excavaciones de dicha zona se realizaron en la campaña de trabajo del año 2009. Tras la exhumación de todos los cuartos se pudo observar la composición de esta estructura, formada por un total de cinco cuartos, denominados 6J2-8, 9, 10, 11 y 12, de tipologías diferentes (Fig. 4.9). El cuarto 6J2-10, ubicado en el centro del edificio, presenta la misma tipología que los cuartos centrales de las alas sur y norte, mostrando un acceso tanto por la fachada oeste, orientada a la gran calzada, como por su fachada oriental, dando paso a la plaza central de la Acrópolis.



Fig. 4.9 Fachada exterior oeste donde se aprecian los distintos cuartos del ala oeste y sus vanos de entrada.

Los cuartos 6J2-8 y 9 de idéntica composición a la tipología A del ala sur, presentan dos vanos de entrada orientados al oeste y una gran banqueteta con apoyos laterales asimétricos. En el cuarto 11, clasificado como tipo D, (Muñoz, Vidal y Peiró 2010) los vanos de entrada son 3, con dos machones intermedios y dos banquetetas, situadas a los laterales del cuarto. De nuevo se trata de estancias con dimensiones colosales, especialmente en este último cuarto, que cuenta con una longitud de 10,6 metros.

El cuarto 12, ubicado en la esquina noroeste, conserva parte de su bóveda y es de tipo B, de lados equivalentes, un único vano de entrada como los cuartos 5 y 6 del ala sur. Esta única abertura se compensa con la tercera del cuarto 11. Así, la fachada original sería totalmente simétrica, con un acceso central más grande y cuatro de menores dimensiones, distribuidos armónica y simétricamente a cada lado (Fig. 4.9).

### 6J3

Este edificio se halla en el espacio de terraza del ala sur. Su construcción se estima que fue resultado de una de las últimas remodelaciones en la Acrópolis, fechado todavía para el periodo Clásico terminal. En esta remodelación, se recreó y niveló el extremo sur de la Acrópolis, convirtiéndolo en una terraza de 630m<sup>2</sup>. Si bien las proporciones de esta remodelación denotan que La Blanca todavía gozaba de un momento de esplendor económico, la factura en concreto de este edificio es de menor calidad, mostrando un empobrecimiento en las técnicas constructivas, en los materiales y en el quehacer de los constructores (Vidal y Muñoz 2013:98).

## 4.2 Los estucos de la Acrópolis de La Blanca

Como se ha relatado en el capítulo anterior, los constructores mayas emplearon el estuco como revestimiento de la arquitectura que conformaba sus ciudades. Estos revestimientos implicaban tanto la zona interna de las estancias, guarecido de las inclemencias del tiempo, como toda la arquitectura expuesta a la intemperie. Como es lógico pensar, casi la totalidad de los estucos que se emplearon para revestir la zona exterior de los edificios no se encuentra actualmente en las exhumaciones de los sitios arqueológicos, debido a los factores ambientales de degradación, entre ellos la lluvia y el crecimiento de la vegetación, que han ido deteriorando estos materiales desde el momento del abandono de las ciudades durante más de 1000 años.

Sin embargo, gracias a la sepultura que proporciona el colapso de las bóvedas de estas construcciones, los estucos que recubren la cara interna de las estancias han llegado hasta nuestros días, hallándose en bastante buen estado tras la excavación y liberación del derrumbe que ocupa el espacio.

Desde que se comenzara con la exhumación del primer cuarto de la Acrópolis de La Blanca, se han hallado fracciones de estuco en el interior de todas las estancias. Por el contrario, las partes externas de las fachadas de estas construcciones se encuentran muy deterioradas, habiéndose perdido, no sólo el estuco de revestimiento, sino incluso gran porcentaje de los sillares exteriores que componen los muros, a consecuencia del intemperismo.

Como parte fundamental de este estudio, se ha desarrollado un seguimiento periódico correspondiente a las sucesivas campañas de trabajo en el sitio, donde se han podido observar y registrar todos los cambios producidos a lo largo de cerca de trece años, desde que se descubriera el primer cuarto en 2005. Muchos de estos cambios y deterioros registrados se deben al avance de la excavación y a la exposición sucesiva de los cuartos que componen la Acrópolis; así como a la degradación de las cubiertas de protección.

### 4.2.1 Caracterización organoléptica *in situ*

#### 4.2.1.1 Localización y extensión

El porcentaje de estuco que se ha conservado en los muros internos de la Acrópolis, depende absolutamente de la arquitectura en pie. Como se comentó anteriormente, casi todas las estancias colapsaron al ser abandonadas como resultado de la descomposición de los dinteles, realizados originalmente de madera. Al perder su resistencia mecánica, todo el peso de la construcción que compone las bóvedas se vino abajo. Por ello, generalmente, la arquitectura que encontramos llega hasta el arranque de la bóveda, y por ende, los revestimientos de estuco también.

#### *Ala sur*

Las estancias que componen el ala sur son 6, siendo los cuatro primeros de mayor tamaño. A excepción del cuarto 5 (6J2-5), todos fueron hallados sin bóvedas, semiderruidos, con una altura de sus muros variable.



Los cuartos 1,2,3,4 y 6, presentan revestimiento de estuco en sus tres muros norte, este y oeste, quedando el machón central (excepto en el cuarto 6), que divide los vanos de acceso, con pocas huellas de estuco, o exento de éste. También presentan estuco en un porcentaje bastante alto en la superficie de la banqueta central, y en la lateral. La conservación del estuco de revestimiento viene determinada por la conservación del sillar de piedra caliza que le sirve de soporte.

En el cuarto 1, el estuco (con el sillar de soporte) alcanza una altura aproximada los 2,40m tanto en el norte como en los laterales este y oeste, quedando visible hacia arriba el relleno interno del muro. En el cuarto 2, la extensión es similar para los muros laterales, aunque el muro norte se vio más afectado, habiéndose conservado el sillar interno, y por tanto el estuco, hasta una altura de aproximadamente 1m de altura desde el nivel de la banqueta central.



Fig. 4.10 Cuarto 6J2-4. Muro oeste (Izda.), este (Dcha.) y norte (central), con estuco conservado.

El cuarto 3, de tipología C, con banquetas laterales, presenta revestimiento de estuco hasta una altura de 1,70m, a partir de los cuales, sólo se conserva el relleno interior del muro. El cuarto 4, conserva en gran medida sus muros norte, este y oeste hasta algo más del arranque de la bóveda, gracias a lo cual se ha conservado una amplia extensión de estuco de aproximadamente 3,50m de altura (Fig. 4.10).

El cuarto 5, mantiene intacta su bóveda original, que ha permitido la conservación del revestimiento interior de ésta. El estuco de este cuarto se conserva en la parte superior, hasta el arranque de la bóveda, habiéndose perdido la franja inferior hasta la altura de la banqueta interior. El cuarto 6, de dimensiones muy pequeñas, ha conservado el revestimiento de sus muros norte, este y oeste hasta una altura de 1,70 aproximadamente.

### *Ala este*

El edificio denominado Palacio de Oriente, se halló muy deteriorado, como se intuía por la arquitectura visible, antes de comenzar la excavación. Las estancias 1 y 5, a ambos extremos de este edificio, han perdido casi la totalidad de sus muros exteriores, habiéndose conservado en mayor medida el muro contiguo a las estancias centrales, que sirve de separación entre los cuartos 1-2, y 4-5. Es por ello, que el estuco conservado en estos dos cuartos (1 y 5), se centra en sus muros interiores (de separación de las estancias centrales). También se localiza estuco en la banqueta central y laterales del cuarto 5 y en la pequeña banqueta lateral del cuarto 1.

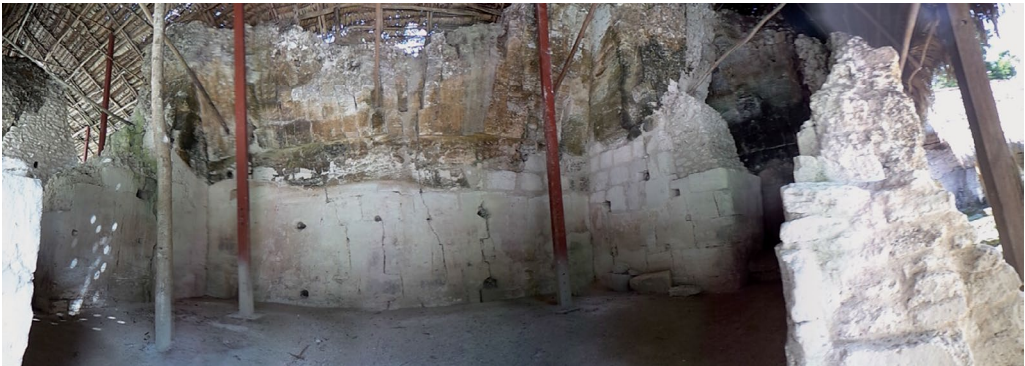


Fig. 4.11 Vista panorámica del cuarto 6J1-3. Los estucos se extienden hasta el arranque de la bóveda en el muro este (central). Acceso interior al cuarto 2 (Dcha) y al cuarto 4 (Izda).

El cuarto 2 es el único ejemplo de este edificio con la bóveda original conservada; sin embargo, al haberse quedado más expuesto a la intemperie, su estuco interior se ha perdido casi por completo.

El cuarto 4 se halló derruido casi por completo, por lo que las muestras de estuco que se conservan se localizan en su banqueta central y en las zonas bajas del muro norte.

El cuarto central del palacio (6J1-3) es sin duda el más completo, ya que ha conservado gran parte de sus muros, gracias en parte a su carácter privado. Los muros este y sur se alzan hasta más allá del arranque de la bóveda, por lo que los revestimientos se extienden hasta ésta. El muro norte que da paso al cuarto 4 se alza a menos altura, y sus estucos se extiende hasta poco más de 1,60m. Los muros occidentales, donde se halla la puerta de acceso, sufrieron gran deterioro, habiéndose conservado el estuco únicamente en las franjas inferiores (Fig. 4.11).

### *Ala oeste*

El gran edificio 6J2 por su lado occidental, presenta cinco cuartos contiguos de proporciones variables. Tras la exhumación de esta construcción, se puede observar cómo la altura conservada de estos cuartos es parecida, manteniéndose de nuevo el muro opuesto a la puerta de entrada (Donde comenzó el derrumbe por el deterioro de los dinteles), en este caso con orientación este.

El cuarto 6J2-8, presenta una gran banqueta central y dos laterales ubicadas a los extremos, sobre la primera. En el muro este, el de mayor altura, el estuco se ha conservado en buen estado, localizándose hasta una altura media. Si bien el estuco se observa firme, la fuerte alveolización de los sillares calizos que constituyen el soporte, ha provocado el desprendimiento del estuco aleatoriamente (Fig. 4.12).

El cuarto 9, contiguo al anterior, presenta la misma tipología constructiva, con la diferencia de que éste solo posee una banqueta lateral, en el extremo sur. Ambas se encuentran revestidas de estuco, si bien los estucos de la banqueta lateral se encuentran afectados por quemaduras, lo que ha ocasionado el desprendimiento de parte de éste. Aunque el muro este conserva todavía gran altura, los sillares de revestimiento de la parte interna, sobre los que se encuentran los estucos, se han perdido en gran parte, conservándose hasta una altura media próxima a los 1,50m. Por ende, los revestimientos sólo se han conservado hasta esta altura. Los muros norte y sur también presentan estucos hasta esa misma altura.



Fig. 4.12 Cuarto 6J2-8 recién exhumado. Se observa la línea divisoria entre la zona que quedó sepultada por el derrumbe y la expuesta, afectada biológicamente.

La estancia que sirve de acceso a la plaza interior de la Acrópolis, 6J2-10, presenta dos cámaras laterales con banqueta central, revestida de estuco, excepto por su cara frontal. Los muros constructivos de la estancia son bastantes altos, sin embargo, los sillares del revestimiento interno, se han conservado de forma distinta. En la parte norte del cuarto, el muro más elevado (norte) conserva sus sillares revestidos de estuco hasta una altura de 1,70 aproximadamente desde el nivel del suelo. Sin embargo la parte sur de la estancia, ha conservado en mayor medida dichos sillares, llegando hasta una altura que sobrepasa los dos metros, medida hasta la que se extiende el estuco.



El cuarto 11, presenta dos grandes banquetas laterales, de las cuales, la que se sitúa al lado norte, posee otra lateral sobre ella. En el espacio que dejan ambas banquetas al centro, se ubica adosado al muro este un pequeño altar. Todos estos elementos presentan zonas de estuco, si bien se ha perdido en algunas partes, sobre todo en los frontales. El muro longitudinal este se erige irregularmente hasta una altura aproximada de 2 m., que conserva sus revestimientos de estuco, aunque en el extremo sur, presenta una zona con pérdida de los sillares internos y por ende del estuco. El muro lateral (sur) conserva su estuco hasta una altura similar. El muro que cierra el cuarto por el norte, se ha conservado en mayor medida, levantándose hasta una altura próxima a los 4 m. Este muro quedó expuesto a la intemperie durante el abandono y la sepultura, y por ello el estuco que se extendía por su superficie sólo se ha conservado bajo el nivel de la sepultura.

El cuarto 12, que cierra esta estructura por el oeste, conserva su bóveda de lados equivalentes. Este cuarto se halla sobre un túnel de saqueo, por lo que dada su inestabilidad y la dificultad para acceder a él, no se han podido intervenir sobre sus estucos. A simple vista, la superficie de sus muros se muestra repleta de pátinas verdosas, por lo que es posible que sus revestimientos de estuco, se hayan perdido al haber estado expuestos y no sepultados, ya que la bóveda del cuarto no colapsó. Este caso sería similar al del cuarto 5 de 6J2.

#### *Ala norte*

El cuarto 13 que cierra el ala norte por su extremo oeste, se encuentra en un estado similar al anterior cuarto 12, ya que conserva también su bóveda. Las pátinas de microorganismos delimitan el espacio que se mantuvo expuesto y el que quedó sepultado. En este caso, la línea de sepultura es muy baja, apenas 50 cm sobre la banqueta, siendo en esta zona donde se han conservado parte de los estucos (Fig. 4.13).



Fig. 4.13 Cuarto 6J2-13; ubicado en la esquina Noroeste, conserva parte de su bóveda original. Fig.4.14 Cuarto 6J2-16; lateral Este, con parte de su estuco conservado en buen estado.



El cuarto 14 y 15, ahora independientes, formaron una sola estancia en origen como demuestra el área de estuco conservado en el muro sur, sobre el que más tarde se construyó el muro de división de ambos cuartos. Los muros externos que forman estas estancias, conservan buena parte de su altura, aunque los sillares internos se han perdido en buena parte, al igual que los estucos, localizándose hasta una altura cercana a los 2m. El muro intermedio que separó ambos cuartos se halla muy derruido, sobrepasando apenas la altura de la banqueta. Se observa estuco en las banquetas centrales de ambos cuartos, así como en la banqueta lateral este del cuarto 14. El muro este del cuarto 15 es el más perjudicado ya que quedó totalmente expuesto y apenas se conserva estuco en su franja inferior, a la altura de la banqueta.

El cuarto 16 que abre el acceso desde la Plaza Norte hasta la plaza interior de la Acrópolis, presenta dos banquetas laterales, siendo la del lado oeste más baja, que han conservado parte de su recubrimiento de estuco, excepto en las partes frontales de las mismas, donde se observan los sillares descubiertos. Los muros este y oeste también se hallaron revestidos de estuco hasta una altura algo inferior a los 2m (Fig. 4.14).

El cuarto 17 presenta una gran banqueta central con dos laterales sobre ésta; todas ellas con parte de recubrimiento de estuco, si bien se hallan zonas de bastante pérdida, como la parte frontal de la banqueta central. La altura de sus muros es de cerca de 2m, habiéndose conservado sus sillares internos y por consiguiente el revestimiento de estuco. Aunque éste se observa firme en las zonas medias y bajas, se han producido pérdidas en las zonas superiores por alveolización de la piedra caliza.

El cuarto 18 cierra el ala norte por el este haciendo esquina. Esta construcción se ha visto bastante afectada estructuralmente, habiéndose producido una gran separación a modo de grieta entre el muro sur y el este. Los muros que lo componen conservan bastante altura, pero los sillares de revestimiento internos se han desprendido en parte, produciéndose una irregularidad en la altura de éstos. El estuco por tanto se localiza hasta donde se conservan dichos sillares, entre 1,50 y 2m de altura. Se observa una zona de gran pérdida de estuco en la parte baja del muro sur, así como en las zonas más altas de los muros, donde la alveolización de la piedra caliza ha producido su desprendimiento. También se localiza revestimiento de estuco en la gran banqueta central, aunque se ha desprendido casi totalmente en la parte frontal de ésta.

#### 4.2.1.2 Color

Las tonalidades que exhiben estos revestimientos, una vez libres de sus concreciones terrosas, son variables dependiendo del ala de la Acrópolis en la que nos encontremos. Así pues, se observan dos tonalidades habituales en estos revestimientos; un tono más blanquecino y un tono amarillento, ambos con variedad de matices.

### 4.2.1.3 Textura y estructura

La variación en la tonalidad de estos estucos, tiene una relación directa con su textura, ya que por lo general, los tonos anaranjados presentan una superficie muy pulimentada, y con cierto aspecto de “hidratación”. Por el contrario las superficies más blancas, muestran un aspecto más “seco”, donde no se aprecia el pulimentado aunque la superficie se encuentre firme y lisa.

Tanto la tonalidad rojiza como la textura plástica de estos revestimientos tiene su origen en la composición mineral que los mayas emplearon. La presencia de este tono, indica claramente la existencia de arcilla de naturaleza férrica en la composición de las pastas de cal<sup>7</sup>. Por el contrario, los estucos más blancos, indican la presencia de una cal grasa, con agregados muy puros en calcita y con menos presencia de arcilla. Cabe añadir, que la tonalidad anaranjada que presentan algunas zonas de los estucos, puede haberse visto intensificada a lo largo del tiempo debido a procesos de deterioro. La aparición de microfisuras, y el agrandamiento de la porosidad como proceso del deterioro sufrido, facilita la migración de las arcillas presentes desde el interior hacia la zona externa, depositándose en estos intersticios creados, que se encuentran más cerca de la superficie (Osete, Kröner y Domenech 2010). Este hecho podría explicar también la variación de intensidad tonal en la superficie de un mismo muro, según haya sido su grado de afección.

Aunque estos estucos fueron trabajados para conseguir la mayor compactación y resistencia posible, se observan generalmente ciertas ondulaciones superficiales, correspondientes a las irregularidades del soporte pétreo. Por ello, las superficies de los muros no fueron ni son exactamente rectas y niveladas, rasgo que concede un carácter muy personal a estos espacios.

Los revestimientos de La Blanca se muestran generalmente llanos en superficie, no obstante cabe señalar el caso del cuarto 6J2-14, donde se observan claramente las huellas en forma de surcos, de un instrumento redondeado y pequeño empleado para su aplanamiento. Este área de estuco corresponde con la zona que fue tapiada para dividir la estancia original en dos cuartos, razón que podría explicar su buen estado de conservación. Otro rasgo físico que llama la atención es el modo de aplicación del estuco en las uniones de los paramentos. Aunque es difícil hallar estuco en estas zonas, se han observado algunos ejemplos en la zona de encuentro entre los muros verticales y la superficie horizontal de la banqueta, y también en la esquina de la bóveda del cuarto 6J1-1. En ambos casos, el estuco pasa de un plano al otro, sin definir el ángulo, sino haciendo curva la esquina. Este hecho podría afirmar el empleo de herramientas redondeadas, como frutos o piedras pulidas, para el aplanado y pulimentado del estuco.

Generalmente, los revestimientos de la Acrópolis de la Blanca presentan dos estratos superpuestos que se pueden distinguir fácilmente en la mayoría de las estancias, aprovechando alguna fractura o grieta gracias a las que poder observar su sección estratigráfica. Esta estructura se observa claramente en los cuartos 3 y 5 del Palacio de Oriente (6J1), donde los desprendimientos del segundo estrato, comúnmente denominado enlucido, dejan a la vista la superficie alisada y compactada del primer estrato, o mortero. En otras estancias, esta separación visual no es tan evidente, observándose sólo una capa de estuco sobre el soporte pétreo. Los resultados de los

<sup>7</sup> Véase siguiente apartado 4.1.2 Análisis Físico-químicos.

análisis por SEM/EDX realizados en el ala sur (Vázquez de Ágredos 2006), demuestran que se componen por dos finas capas firmemente adheridas. En los cuartos 1, 2, 3 y 4 de esta zona, la imagen del microscopio electrónico muestra claramente la línea de separación entre el primer y segundo estrato. Sin embargo en los cuartos contiguos 5 y 6, así como en los cuartos 1 y 2 de 6J1, esta separación no se observa, por lo que podría indicar que el segundo estrato se aplicó sobre el primero cuando éste todavía se encontraba fresco (*ibíd*); o bien que los estucos de estas estancias se componen de un único estrato.

## 4.2.2 Caracterización físico-química

### 4.2.2.1 Propiedades hídricas

Con el fin de caracterizar las propiedades hídricas de los estucos, se han realizado ensayos de penetración de agua sobre una selección de estucos de la acrópolis de La Blanca. Este sencillo método, nos aporta información sobre el estado de deterioro de los materiales, que no se observa a simple vista, especialmente el incremento de porosidad, o la existencia de microfisuras que se han ido desarrollando con el tiempo y que favorecen a la mayor absorción de agua. Con este ensayo se puede medir la cantidad de agua absorbida por área en un tiempo determinado. El ensayo se ha realizado siguiendo el método de ensayo RILEM II.4. Para ello se emplea un tubo o pipeta, (también denominado Karsten) que tiene forma de L y una base circular de 2,5 cm, que apoya contra la superficie. Su altura es de 12 cm con capacidad de 17 ml. Cuando el tubo está lleno de agua ejerce en la superficie una presión equivalente a 1177,2 Pascales, o a una presión dinámica del viento de 157,8 km/h (RILEM 1980). El ensayo consiste en adherir el tubo en la superficie a ensayar, mediante una masilla de sellado, fácilmente removible. Se llena de agua hasta la marcación superior (0 ml) y se anota la cantidad de agua absorbida en los periodos de tiempo estimados. Se consideraron los periodos de tiempo 1, 3, 5, 10, 15 y 20 minutos, aunque algunos de los ensayos se demoraron hasta 90 minutos.

Las áreas de estuco a ensayar se seleccionaron en base al estado de conservación que presentaban. En un principio se seleccionó una zona estable de cada muro (norte, sur, este y oeste) que compone las estancias (Tabla 4.1). Al comenzar con el primer ensayo se descartó la viabilidad de ensayar en todas las superficies, dado el tiempo que consumía cada uno de los ensayos. Por ello, finalmente se tuvieron que seleccionar únicamente una estancia de cada ala de la Acrópolis para poder llevarlo a cabo.

Tabla 4.1 Relación de puntos seleccionados para realizar el ensayo de penetrabilidad de agua.

ESTRUCTURA	CUARTO	MURO	SIGLA
6J1	3	NORTE enlucido	6J13MN1
		NORTE mortero	6J13MN2
		ESTE-esquina norte	6J13MEN
		ESTE-centro	6J13MEC
6J2	4	NORTE	6J24MN
	10	NORTE	6J210MN
		OESTE	6J210MO
	16	ESTE	6J216ME
		OESTE	6J216MO

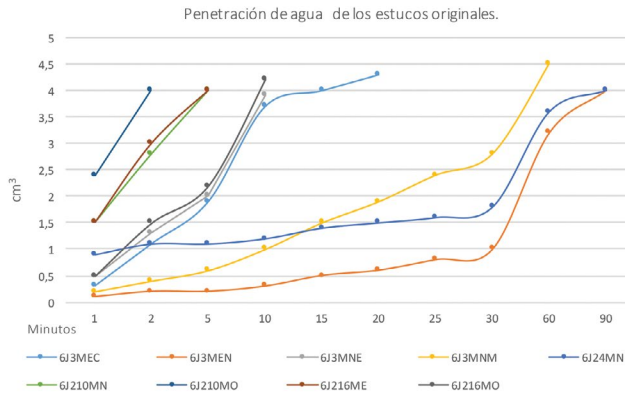


Gráfico 4.1 Curvas de absorción de agua de los estucos originales.

Al finalizar el ensayo se observan resultados muy distintos (Gráfico 4.1). Las absorciones de los cuartos 6J2-10 (6J210MN y 6J210MO) y 6J2-16 (6J213ME y 6J216MO), son rápidas y abundantes, penetrando gran cantidad de agua en los primeros 5 minutos. Para el mortero del muro este de 6J1-3 (6J13MN2), la penetración es lenta y gradual debido a la compactación y pulimentado que se puede observar a simple vista. Por el contrario, el enlucido que se superpone a éste, tiene poca resistencia a la penetración de agua, absorbiendo hasta cerca de 4 ml en los cinco primeros minutos. Esto puede deberse a la irregularidad que presenta esta superficie, causada por la erosión, que seguramente haya abierto la porosidad y otras vías de acceso del agua. A diferencia de estos parámetros, los ensayos de los muros este de 6J1-3 (6J13MEN) y norte de 6J2-4 (6J24MN), presentan una resistencia a la penetración de agua sorprendente, especialmente el estuco del muro del Palacio de Oriente, con menos de 0,5 ml de agua absorbida a los 10 minutos de ensayo.

Interpretando la base científica de este ensayo, encontramos que para el estuco 6J13MEN, tendría una resistencia a la penetración tal que ante lluvias con viento de 157,8 Km/h, (o lluvia con una presión de 1177,2 Pa), apenas habría penetración de agua durante los treinta primeros minutos. Pasado este tiempo, conforme la red porosa va humectándose, la penetrabilidad de agua comenzaría a ser mayor. Este dato sin duda es orientativo pues estamos hablando de un solo ensayo, con un área muy pequeña de contacto de 4,9 cm<sup>2</sup>, que no puede ser considerada determinante para definir el comportamiento general del estuco. Pero sí nos ayuda a comprender que efectivamente, las construcciones tanto de La Blanca, como de otros asentamientos del área maya, estuvieron bien protegidas de las lluvias, sobre todo en las fachadas exteriores, gracias a estos estucos compactados y pulimentados a conciencia, para lograr la mínima penetración de agua.

#### 4.2.2.2 Caracterización química

Estudios realizados por el Proyecto (Doménech y Vázquez de Ágredos 2006) anteriormente sobre muestras de los revestimientos de estuco de las estancias del ala sur de 6J2 y del ala este (Palacio de Oriente), han permitido conocer importante información compositiva y técnica que nos ayuda a entender la metodología en la elaboración de estos revestimientos. De forma general, los estucos se componen de una matriz de cal mas agregados calcícticos, (*Sascab*). De forma particular,

esta matriz cálcica se encuentra acompañada de ciertas sustancias que ofrecen plasticidad y que han contribuido a mejorar las propiedades mecánicas del mortero endurecido, y a favorecer el pulimentado de la superficie. Encontramos arcillas, como la atapulgita, principalmente presente en los enlucidos, y gomas o exudados vegetales añadidos a los morteros. Como dato técnico se observan diferencias entre la composición de los distintos estratos de algunas muestras (6J2-1, 6J2-3, 6J2-4) donde el primer estrato o mortero presenta aditivos vegetales y el segundo estrato o enlucido únicamente arcillas. También se aprecia una diferencia en el momento de aplicación del enlucido ya que en algunas muestras se observa una línea de separación entre ambos (que indica que el mortero estaba seco al aplicarse el enlucido), mientras que en otras muestras no se aprecia esta línea divisoria (lo que indicaría que el mortero se encontraba fresco al aplicarse el enlucido). Los resultados fueron obtenidos por Microscopía Electrónica de Barrido con Dispersión de rayos x (SEM/EDX). Se muestra una síntesis en la siguiente tabla (Tabla 4.2).

Tabla 4.2 Descripción compositiva de las distintas muestras de estuco estudiadas por SEM/EDX. (Doménech y Vázquez de Ágredos 2006).

ALA SUR				
Cuarto	Muestra	Composición	Fibras	Línea
6j1-1	Enlucido	Carbonato cálcico, <i>Sascab</i> , y arena de sílice		No
	Mortero	Carbonato cálcico, <i>Sascab</i> y arena de sílice		
6j1-2	Enlucido	Carbonato cálcico, <i>Sascab</i> , y arena de sílice		No
	Mortero	Carbonato cálcico, <i>Sascab</i> , y arena de sílice		
6j2-7	Enlucido	Carbonato cálcico, <i>Sascab</i> , y arena de sílice		No
	Mortero	Carbonato cálcico, <i>Sascab</i> , y arena de sílice		
6j2-6	Enlucido	Carbonato cálcico, <i>Sascab</i> , atapulgita, sulfato de bario y azufre.	No	No
	Mortero	Carbonato cálcico, <i>Sascab</i> , atapulgita.	No	
6J2-5	Enlucido	Carbonato cálcico, <i>Sascab</i> , atapulgita.	No	No
	Mortero	Carbonato cálcico, <i>Sascab</i> , atapulgita, potasio y azufre.	No	
6J2-4	Enlucido	Carbonato cálcico, sulfato de bario y Arcillas ricas en hierro y fósforo.	No	Si
	Mortero	Carbonato cálcico y arena de sílice.	Si	
6J2-3	Enlucido	Carbonato cálcico, <i>Sascab</i> , arcilla atapulgita, ligeramente acompañado de hierro.	No	Si
	Mortero	Carbonato cálcico y arena de sílice.	Sí	
6J2-2	Enlucido	Carbonato cálcico, <i>Sascab</i> , atapulgita con acompañamiento de fósforo.	Si	Si
	Mortero	Carbonato cálcico y arena de sílice.	No	
6J2-1	Enlucido	Carbonato cálcico, <i>Sascab</i> , arcilla de caolín contaminada con fósforo.	No	Si
	Mortero	Carbonato cálcico y arena de sílice, sulfato de bario y azufre.	Si	

#### 4.2.3 Evidencias artísticas

Los revestimientos que los artífices mayas aplicaron sobre los muros de sus construcciones, además del mencionado carácter protector, tuvieron una función estética muy importante: la exposición de acontecimientos señalados. Estas manifestaciones artísticas, halladas sobre todo en

los revestimientos interiores de las estancias, es un hecho que se da en toda el área maya, en mayor o menor medida, si bien es cierto que son pocos los ejemplos hallados debido al avanzado estado de deterioro en que se encuentran estos materiales al ser liberados. Los revestimientos de la Acrópolis de La Blanca muestran diversas evidencias artísticas, que aunque en pequeña cantidad conservadas, nos permite proyectar el nivel de ornamentación que pudieron lucir estas estancias durante el Clásico Tardío. Las manifestaciones artísticas más representativas que se hallan en los revestimientos de la Acrópolis son los grafitos incisos y la pintura mural; aunque también se han descubierto dibujos realizados en grafito, pero en avanzado estado de degradación.

#### 4.2.3.1 Grafitos<sup>8</sup> incisos

Estos dibujos incisos se encuentran por toda la superficie de los revestimientos de la Acrópolis y han sido ampliamente documentados y estudiados por el Proyecto desde que se descubrieran los primeros grafitos en el cuarto 6J2-4, en 2004 (Fig. 4.14).

##### *Tipos*

En La Blanca hallamos cuatro tipos de grafitos atribuidos a épocas sucesivas de ejecución (Vidal y Muñoz 2009).

- o El primer tipo correspondería a los primeros grafitos o grafitos “originales”, realizados durante la etapa de ocupación del sitio, especialmente en el Clásico Terminal (850-1000 n.e), y ejecutados con cierta pretensión artística ya que destacarían sobre la pintura mural de las estancias.
- o El segundo tipo corresponde a grafitos realizados con posterioridad sobre los primeros, con trazos más torpes, posiblemente realizados en la reocupación tras el abandono del sitio (Postclásico Temprano 1000-1200 n.e).
- o El tercer tipo correspondería a los grafitos realizados en época colonial (siglos XVI-XIX).
- o El cuarto tipo serían las incisiones realizadas sobre los anteriormente descritos, de época contemporánea (siglos XX-XXI).

##### *Composición y técnica*

La distribución de los grafitos en las estancias no se corresponde a ningún esquema compositivo, sino que se presentan aleatoriamente, de forma anárquica, superponiéndose a menudo unos a otros y creando superficies profusamente rayadas, donde resulta difícil discernir los grafitos originales de los que se realizaron posteriormente. Conforme se han ido exhumando las estancias de la Acrópolis de este asentamiento, se han ido desvelando diferentes grafitos de factura similar, que muestran distintos estilos o calidades artísticas. En la actualidad, con la totalidad de la acrópolis excavada, se han podido registrar y clasificar en dos grupos iconográficos; los motivos o tipos iconográficos aislados y las escenas (Vidal y Muñoz 2009).

<sup>8</sup> El término grafito deriva del italiano *graffiare* que quiere decir “arañar” o “rascar” (Herbert 2009). Este término ha sido adaptado al español, siendo ya un término ampliamente extendido y empleado para estas manifestaciones artísticas en el área maya.

### *Motivos iconográficos aislados*

Son aquellos grafitos donde sólo se representa un elemento, sin tener en cuenta la posibilidad de haber formado parte de una escena no conservada. Entre éstos se encuentran los motivos antropomorfos, zoomorfos, fitomorfos, geométricos, abstractos, arquitectónicos, seres sobrenaturales, atributos sexuales, astrales y símbolos escriturarios (Vidal y Muñoz 2009). De los grafitos comprendidos en esta categoría, destacan principalmente los motivos zoomorfos, como la representación de un venado en el muro Este del cuarto 6J2-4. Este motivo es de grandes dimensiones y de trazo sutil, apreciándose con claridad al animal de perfil con la pata trasera flexionada, la delantera estirada, el hocico entreabierto y la lengua fuera. Junto a este motivo se encuentran otros dos que representan a un jaguar y a un anfibio o reptil, de factura similar pero de menor tamaño.

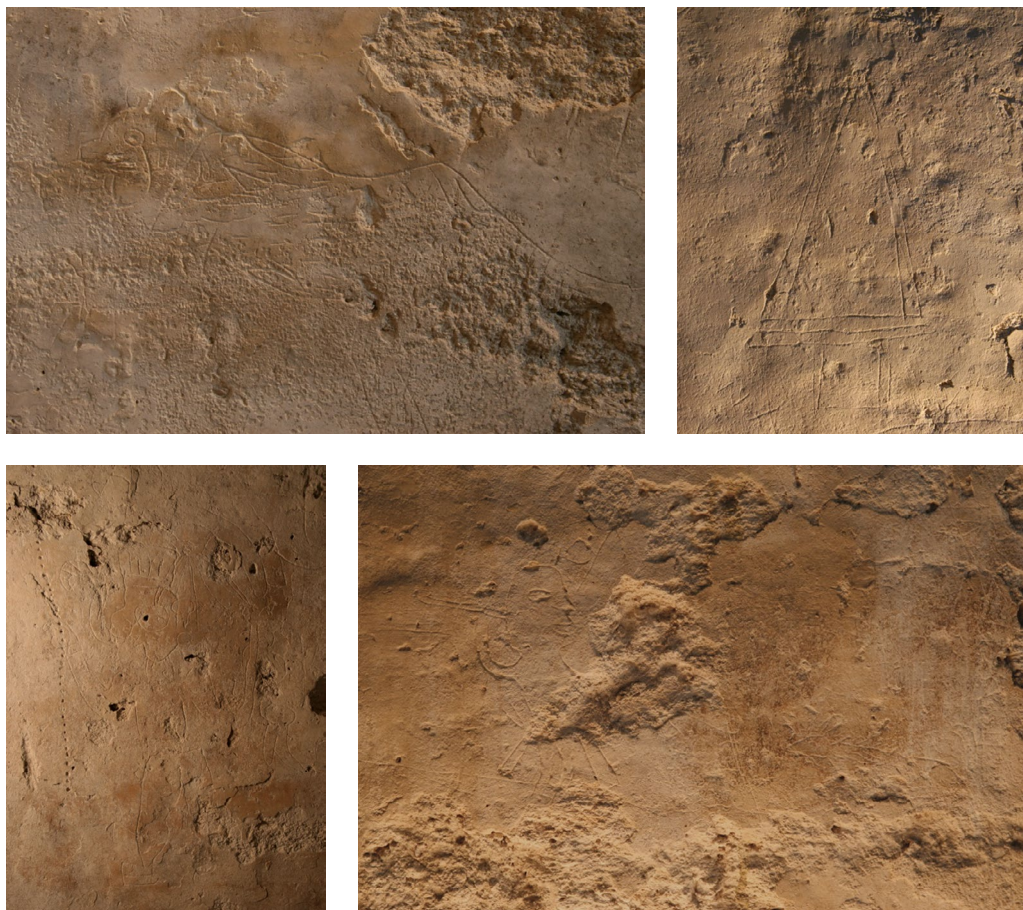


Fig.4.14 Superior Izda.: Motivo zoomorfo que representa a un jaguar en 6J2-4, muro este. Superior. Dcha.: Motivo aislado que representa una casa con techado de palma en 6J2-3, muro oeste. Inferior. Izda.: Motivo antropomorfo que representa un personaje con tocado en 6J2-3, muro norte. Inferior. Dcha.: Escena de caza donde se aprecia una lanza o propulsor y un animal pequeño en 6J2-1, muro este. Fuente: PLB 2007.

De los motivos antropomorfos destacan algunos como el individuo músico, ubicado en el muro Norte de este mismo cuarto, que parece estar soplando un instrumento similar a una flauta. Los trazos de este grafito son rígidos y esquemáticos, como se observa en los dedos de pies y manos, que se han resuelto con simples líneas rectas. Este grafito se halla en la franja baja del muro, a poca separación de la banqueta que ocupa el cuarto, y se ha visto afectado por el desprendimiento de parte de estuco, por lo que se han perdido las líneas que lo completarían. Individuos similares se hallan en los cuartos 2 y 3 de 6J2, representados de frente con la cabeza de perfil, portando tocado y objetos en la mano.

Otros motivos distintivos son los arquitectónicos aislados, que aparecen en la mayoría de los estucos de las estancias en forma de pirámides escalonadas, de mayor o menor tamaño, o viviendas con altos techados triangulares, repletos de líneas diagonales cruzadas, en representación de la hoja de palma empleada en su construcción. Los atributos sexuales representados en forma de vulvas, aparecen de forma abundante en la parte superior de algunos cuartos, sobre todo en 6J2-5, donde se han documentado un gran número de éstas, plasmadas de forma aislada, en grupos de dos o tres, o en hileras horizontales de más de cinco. Todas ellas se realizaron con fuertes trazos provocando un surco muy pronunciado.

### *Escenas*

Como tal se consideran la composición de varios elementos relacionados entre sí, representando una acción (Vidal y Muñoz 2009). La escena más representativa hallada en La Blanca por su realismo y calidad de los trazos, es la ubicada en el muro este de 6J1-3. En esta escena se representa a un gobernante sentado sobre una banqueta, portando un tocado y dirigiéndose al individuo que se arrodilla ante él en actitud de ofrenda, que porta algo entre sus manos. Bajo éste, se sitúa otro individuo arrodillado y un tercero que aparece soplando una especie de trompeta. La ejecución de esta escena posee una calidad artística superior en comparación con el resto de grafitos hallados, mostrando gran realismo en los cuerpos y rostros, y bastante similitud con las decoraciones de vasijas cerámicas, como si éstas hubieran sido su fuente de inspiración.

En cuanto a la técnica de ejecución, los diferentes tipos de líneas que muestran estos grafitos indican que pudieron haber sido realizados con distintos instrumentos afilados, con mayor o menor presión. Dos factores fundamentales pudieron haber influido en el resultado de estas expresiones; en primer lugar el estuco. Aspectos como la composición, el pulimentado, la granulometría, o el tiempo transcurrido desde la aplicación del estuco, son decisivos en el trabajo de incidir la herramienta. En segundo lugar, esa herramienta empleada, su dureza y filo puede marcar la diferencia entre los trazos finos y limpios y los más toscos.

En 2008, se realizaron una serie de ensayos experimentales *in situ*, para la reproducción de estos grafitos en el muro expositivo del Centro de Interpretación de La Blanca (Carrascosa Lastras y Lorenzo 2009). Para estos ensayos se emplearon varias probetas de estuco, más o menos endurecido, y herramientas de madera, hueso, asta y obsidiana. Los mejores resultados (trazos finos y definidos) se dieron con la incisión de obsidiana, tanto con el estuco fresco como endurecido, aunque las demás herramientas realizaban incisiones controlables y definidas con el estuco fresco<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> Véase Lorenzo F. 2010 "Los grafitos de La Blanca, Petén, Guatemala. Estudio, registro y reproducción". Tesis de máster. *Universitat Politècnica de València*.



#### 4.2.3.2 Pintura mural

Las pinturas murales que originalmente llenaron de color los edificios de La Blanca, se encuentran actualmente perdidas casi en su totalidad. A pesar de haberse convertido en apenas unos vestigios puntualmente localizados, se han podido documentar restos de color en la mayoría de los edificios que componen La Blanca, y que han sido investigados por el Proyecto (6J3, 4H1, Sub-1 y Sub-2), desvelando datos compositivos, técnicos y de procedencia, que nos ayudan a entender todo el proceso implicado en dar color a estas estancias (Doménech y Vázquez de Ágredos 2006, 2007). A pesar de la magnitud arquitectónica conservada y de los revestimientos interiores, que se localizan en buena parte de las estancias que componen la Acrópolis, apenas encontramos pequeñas huellas pictóricas sobre estas superficies.

Los colores que se conservan en los muros de La Blanca, pertenecen en mayoría a una gama cromática cálida, donde predominan el rojo, los ocres y naranjas. Encontramos también verde y azul maya, negro y blanco. El origen de estos colores, está en los pigmentos locales que los mayas seleccionaron y procesaron para su empleo en la pintura mural. Así pues, los colores cálidos, proceden de minerales inorgánicos de naturaleza férrica, concretamente óxidos de hierro. La hematita y la hematita especular ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) se emplearon para elaborar los pigmentos rojos; la limonita ( $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) para los amarillos y ocres; y la ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ) para los tonos más anaranjados. El negro tiene su origen en el carbón vegetal y el blanco en la cal (Doménech y Vázquez de Ágredos 2007:114). Los tonos verdes y azules, sin embargo, no son de naturaleza inorgánica como pudiera parecer, ya que los suelos del área maya carecieron de formaciones de minerales aptas para elaborar estos pigmentos, como la malaquita  $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$  o la azurita  $\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot 2(\text{CuCO}_3)$ , propios de regiones Mexicanas. Por lo que su empleo en área maya debió estar condicionado por la importación de estos minerales desde otras zonas de Mesoamérica (Doménech y Vázquez de Ágredos 2006:145). Los colores verdes y azules presentes en La Blanca son de origen orgánico, procedentes del tinte de la planta del índigo. El tinte extraído, totalmente inestable, era procesado y estabilizado depositándolo en matrices inertes de arcilla blanca, de tipo atapulgita, que se horneaban a bajas temperaturas para consolidar el tinte y obtener estos tonos verdes y azules (*ibíd.*:144).

Todos estos pigmentos se obtuvieron del entorno próximo a La Blanca, ya que cuenta con varios yacimientos ricos en minerales que bien pudieron ser aprovechados por los pintores de La Blanca. Entre estos yacimientos destaca el denominado Cerro del Camalote, localizado a 800m del sitio, con formaciones ricas en cuarzo, calizas y arcillas (*ibíd.*:136).

La técnica pictórica que los artistas mayas emplearon para decorar las estancias de La Blanca fue el seco (*ibíd.*:140). Esto significa que los pigmentos minerales, debidamente molidos, se mezclaron con algún aglutinante que permitiera la aplicación y fijado de los pigmentos sobre la superficie del mural. El empleo de esta técnica se evidencia al observar las muestras al microscopio óptico, donde se aprecia perfectamente la línea divisoria entre el enlucido y el estrato pictórico.

El empleo de una técnica al seco, explica también que estas pinturas se hayan perdido casi por completo, siendo más susceptible al deterioro que una técnica al fresco. Al estar aplicadas sobre la superficie del estuco, se han visto afectadas por la continua erosión, derrumbes y agentes medioambientales, desde que fuera abandonado el sitio. Por otra parte, al estar aglutinadas con un extracto de naturaleza orgánica, la degradación de éste aglutinante con el tiempo, provocaría el rápido desprendimiento de los pigmentos.

En cuanto a la localización de los colores dentro de las estancias; se han documentado azules y negros en las bóvedas y arranque de bóveda, encontrándose el negro especialmente ubicado en las esquinas, y el azul por toda la superficie. El resto de colores de la paleta cromática, se localiza en las partes bajas de los muros, por debajo del arranque de las bóvedas (Doménech y Vázquez de Ágredos 2007:112). Podríamos imaginar las grandes bóvedas azules, delimitadas por líneas negras y amplias escenas coloridas en los paños de los muros verticales, pero las escasas evidencias de color no son suficientes para definir todo este espacio.

#### 4.2.4 Estado de conservación de los estucos

##### 4.2.4.1 Liberación de las estancias. Secuencia cronológica

La campaña de 2004, se aprovechó para realizar las primeras acciones de aproximación al sitio tales como prospecciones arqueológicas en los pozos de saqueo y cerramiento de éstos, sondeos arqueológicos en el entorno del sitio, el estudio de la arquitectura visible y la primera toma de contacto con los revestimientos de estuco. Con esta información se realizaron los pertinentes estudios de gabinete para implementar medidas de conservación de urgencia tanto en la arquitectura como de los estucos, vestigios pictóricos y grafitos (Vidal 2005:36).

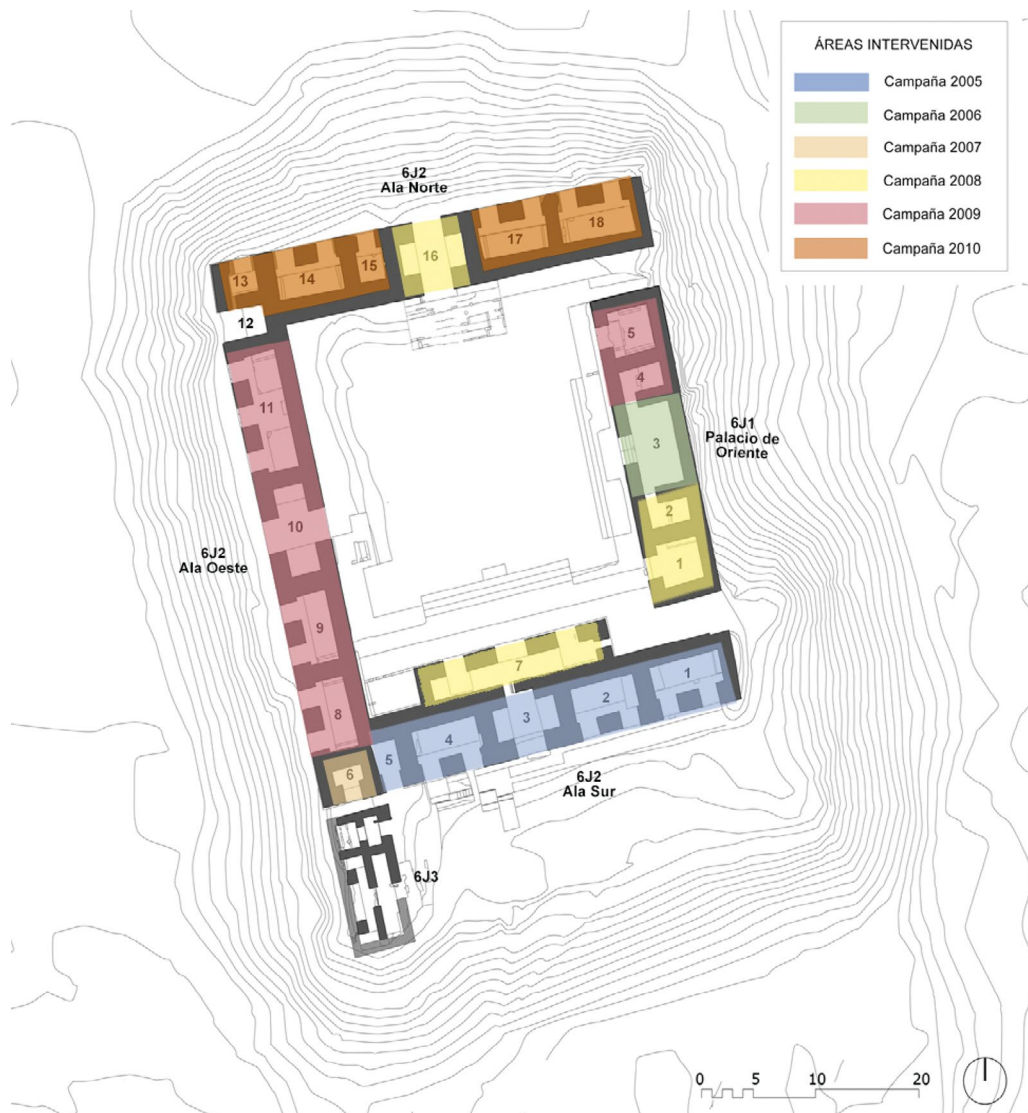


Fig.4.15 Planta de la Acrópolis con indicación de estancias excavadas en cada campaña de trabajo. Tomado de *Muñoz, Vidal y Peiró* y modificado por la autora.

En la siguiente campaña de trabajo, en 2005, se comenzó con la liberación de los derrumbes que ocupaban las estancias del ala sur de la Acrópolis, comenzando por el cuarto 6J2-4, que había sido ya prospectado en la anterior campaña. Se excavaron las estancias 6J2-1, 2, 3,4 y 5 (Fig. 4.15).

En la campaña de 2006, las acciones dirigidas a la liberación de los derrumbes se centraron en el cuarto 6J1-3, la estancia principal del Palacio de Oriente y en 2007, el cuarto 6J2-6, del ala sur.

En 2008 fueron excavados los cuartos 6J2-7, completando la liberación de las estancias del ala sur, también las estancias 1 y 2, contiguas a 6J1-3 ya liberada, y el cuarto 6J2-16 del ala norte.

En la campaña de trabajo de 2009, el trabajo de liberación se centró en el ala oeste, excavándose todas las estancias, 6J2-8, 9, 10, y 11. También se excavaron los cuartos 4 y 5 de 6J1, completando la liberación del Palacio de Oriente.

La excavación de las estancias de la Acrópolis quedó finalizada en la campaña de 2010, con los cuartos del ala norte; 6J2-13, 14, 15, 17 y 18.

Con ello, quedaron expuestos a las nuevas condiciones ambientales los revestimientos de estuco que se hallan en el interior de todas estas estancias, con una diferencia de tiempo de cinco años, desde que se liberaran los primeros cuartos del ala sur, hasta las últimas excavaciones en 2010. Como se expone en los siguientes apartados, este periodo de tiempo y las medidas de protección inmediatas llevadas a cabo, han influido directamente en el estado de conservación de los cuartos exhumados, especialmente de los primeros.

#### 4.1.4.2 Principales patologías presentes en los revestimientos

Los estucos que recubren el interior de las estancias de La Blanca, se han visto afectados por infinidad de agentes, desde el momento en que fueron elaborados y aplicados sobre su soporte. En primer lugar por las condiciones medioambientales propias del clima tropical, en especial las abundantes lluvias características de la región y las elevadas temperaturas. En segundo lugar por el colapso de las bóvedas y la sepultura de las estancias habitacionales donde se encuentran, y finalmente por el gran impacto que supone la excavación arqueológica y con ella, la exposición de estos materiales de nuevo a la intemperie.

Estos factores han ocasionado numerosos daños en los revestimientos, que atendiendo al periodo en el que se ocasionaron, se han clasificado en tres grupos: las patologías producidas en los estucos durante el periodo de uso original, en el Clásico Tardío y Terminal y también durante la breve reocupación en el periodo del Postclásico temprano; las producidas durante el largo periodo de abandono definitivo de la ciudad; y finalmente todas las patologías que se activaron y desarrollaron desde el momento de la exhumación y exposición a la intemperie.

##### *Producidas durante las etapas de ocupación*

En este apartado se incluyen las patologías derivadas de la actividad humana en el interior de los edificios que se asocian a periodos de ocupación distintos de la etapa inicial, para la cual fueron creados los edificios. Estos periodos son tardíos y en algunos casos los edificios ya habían comenzado a colapsar, como se deriva de los niveles de derrumbe sobre los que se han hallado las evidencias de ocupación.

##### *Quemados:*

Son numerosas las ocasiones en las que el estuco se muestra afectado por una combustión, pudiendo encontrar varios ejemplos en el interior de las estancias. Las evidencias

arqueológicas halladas en niveles de derrumbe o asociadas a material de época tardía, indican que estas actividades de fuego, se realizaron durante las reocupaciones del sitio, en periodos de inestabilidad, cuando los habitantes iniciales ya habían abandonado la ciudad.

En la esquina noroeste del cuarto 6J2-7 se halló un área del estuco quemado junto a un vestigio de hoguera con acumulación de carbón (Vidal 2008:50). En el cuarto 6J2-9, parte de la banqueta lateral sur y gran parte del estuco de la esquina sureste, se halló visiblemente afectada por la combustión, presumiblemente de una hoguera (Fig. 4.16). El cuarto 6J2-11, presenta en el centro de la estancia un elemento constructivo a modo de altar, adosado a la pared, la cual se encontró con manchas de quemado sobre el estuco (Vidal 2009:42). Asimismo, en el cuarto 15 de este mismo edificio, se descubrió el estuco del piso quemado junto a carbón, ceniza y cerámica asociada al Clásico Terminal (900-1000 n.e) (Vidal 2010:39). También en el cuarto 17 de esta misma ala, se halló una capa de ceniza a los pies de la banqueta noroeste y una rotura en el piso de estuco quemado, con acumulación de carbón y material lítico, óseo y cerámico; asociado al Clásico Terminal (Vidal 2010:41). Además de estos daños por combustión en diferentes zonas de las estancias, se han hallado ollas<sup>10</sup> cerámicas y resto de material cerámico de época tardía, asociados a actividades con implicación de fuego.



Fig. 4.16 Cuarto 6J2-9; la excavación sacó a la luz los restos de una vasija ceremonial sobre la banqueta lateral sur y un estuco visiblemente afectado por la combustión de la ofrenda. Fig. 4.17 Cuarto 6J2-11. Presencia de un estuco tosco aplicado sobre el estuco original, posiblemente con la finalidad de reparar una grieta u orificio.

### *Reparaciones:*

En la mitad sur del muro este de 6J2-11, se observa un mortero de cal aplicado sobre el revestimiento original de estuco. Este mortero sin pulimentar, es de factura burda, que destaca por su heterogeneidad, con impurezas de cal, ceniza y lodo, macroscópicamente visibles. Se encuentra taponando un orificio producido en la arquitectura, por lo que se deduce que se trata de la reparación de un daño producido en este muro. Por el tipo de elaboración, se deduce que podría corresponder también a las reocupaciones de etapas tardías en el sitio. Si bien se halla sobre todo sellando este espacio, se ha aplicado también sobre el estuco original, quedando adherido a éste y ocultándolo (Fig. 4.17).

<sup>10</sup> Ollas de cerámica de Tipo Pozo sin Engobe, correspondiente al Postclásico Temprano se hallaron en los cuartos 6J2-8, 9 y 16. (Véase Vidal y Muñoz 2008, 2009, 2010)

### *Producidas durante el abandono*

El abandono final de esta ciudad por parte de sus ocupantes, produjo la decadencia total de ésta, y con ello, el apoderamiento de las ruinas por parte de la vegetación. La estructura de las estancias se vio debilitada por el pudrimiento o sustracción de los dinteles, presumiblemente de chicozapote<sup>11</sup> (Muñoz 2006b:30), que formaban parte de la estructura arquitectónica. Estas bóvedas fueron desplomándose en el interior de los cuartos, formando un estrato de derrumbe, que paulatinamente fue creciendo por arrastre y acumulación de tierra, vegetación y otros depósitos orgánicos. Al excavar los cuartos, el nivel hasta donde llegó el derrumbe mas la acumulación de tierra, es perfectamente identificable al producirse una línea divisoria en la superficie de los muros, diferenciándose entre las zonas que quedaron expuestas a la intemperie y las que quedaron bajo el derrumbe en ambiente de sepultura. En relación a estos dos ambientes en los que permanecieron las ruinas durante el periodo de abandono, se observa la aparición de distintas patologías.

Los principales daños presentes en la arquitectura que permaneció expuesta son:

#### *Colonización de microorganismos y macro-flora*

Los muros que permanecieron sobre el nivel de derrumbe, generalmente han perdido su revestimiento ya que han estado expuestos a las continuas lluvias y radiaciones solares, así como a la erosión del viento y a la acción mecánica y química de microorganismos y plantas. Generalmente se observan los sillares compositivos, ya exentos de estuco, recubiertos por una gruesa capa de concreción biológica y plantas mayores. Estas plantas y árboles que crecen rápidamente sobre las ruinas, también pudieron causar la aceleración del derrumbe de las bóvedas al penetrar las raíces entre los materiales compositivos, debilitando a la ya dañada estructura (Fig. 4.18).

A pesar de las hostiles condiciones del entorno, se localizan algunos fragmentos de estuco conservados en los cuartos que han mantenido parte de sus bóvedas; como en 6J1-1 (Muro norte), 6J1-2 (Interior de la bóveda), 6J1-3 (Muro este), 6J2-5 (Interior de la bóveda) y 6J2-11 (Muro norte), donde el escalón producido por el arranque de la bóveda, así como el refugio que implica la propia bóveda, han contribuido a la conservación de pequeñas zonas de estuco<sup>12</sup>. Éstos se ven afectados por las mismas patologías descritas, presentando coloraciones verdosas, propias de la actividad microbiológica, resultando difícil a menudo distinguir el estuco de su soporte.

#### *Daños antrópicos*

En estas zonas que quedaron expuestas se hallan numerosos dibujos incisos así como firmas de aquellos testigos que, siglo tras siglo, fueron pasando por La Blanca. Un buen ejemplo es el muro oeste del cuarto 6J2-4, cuya zona superior, elevada de las ruinas, sirvió de lienzo

<sup>11</sup> Árbol de la especie *Manilkara Zapota*, de cuya resina se produce el chicle natural y cuya madera es muy apreciada por su dureza y resistencia frente a los insectos isópteros. En época maya se empleó para elaborar dinteles, ricamente labrados.

<sup>12</sup> Siempre en referencia a la cara interna de la arquitectura expuesta.

a numerosos exploradores y visitantes (Fig. 4.19). Es destacable la gran firma de época colonial que ocupa la parte alta de este muro, que expone: "*Pedro Montañés pasó a 30 de... de 1752*" (Vidal y Valdés 2007:20). También se hallaron grandes dibujos incisos de época contemporánea sobre el muro ciego del ala oeste, sin revestimientos y recubierto de una gruesa concreción biológica.

La arquitectura que quedó sepultada por el derrumbe, al abrigo de la intemperie, muestra un estado de conservación bastante diferente. Estas condiciones de sepultura produjeron un ambiente estable donde los materiales alcanzaron el equilibrio, conservándose en bastante buen estado. Por ello es bajo este estrato de derrumbe donde se hallan los revestimientos de estuco mejor conservados. Pero a pesar de disponer de mejores condiciones para su conservación, también se vieron afectados por distintos factores de deterioro que han provocado daños en el material; entre ellos los derivados del propio derrumbe.

Las principales patologías presentes en la arquitectura que permaneció sepultada son:

### *Roturas y fracturas*

Las zonas inferiores de las habitaciones, se vieron afectadas por el derrumbe de sus propias bóvedas. Este derrumbamiento ocasionó importantes roturas y fracturas en los materiales debido al impacto de la caída de los sillares y relleno del muro. Parte de las roturas en las banquetas interiores, así como en los revestimientos de éstas, pudieron haberse producido de este modo.

Muchas de las fracturas y sobre todo fisuras que se hallan en los revestimientos al ser excavados derivan de la acción radicular de las plantas mayores, que si bien crecen sobre el nivel de derrumbe, sus pequeñas raíces pueden llegar a penetrar en profundidad. Esta causa origina daños significativos, sobre todo cuando las raíces se abren paso entre el estuco y su soporte, condenándolo a desprenderse conforme el material va secándose tras la excavación.

Otro tipo de fracturas y fisuras son las provocadas tanto por dichas raíces, como por agrietamientos a nivel estructural, que han provocado la rotura de la superficie del estuco. Estas fisuras, se ven agravadas cuando el estuco muestra zonas quemadas, como consecuencia de algunas hogueras efectuadas en el interior de las estancias en el periodo de ocupación. Estas zonas suelen mostrar una tonalidad grisácea y un estuco más seco y quebradizo.

### *Desprendimientos*

Como consecuencia de las fracturas producidas por acción radicular o por movimientos de asentamiento en el edificio, a menudo porciones de estuco se separan de su soporte pétreo, manteniéndose en el lugar por la presión de la tierra de sepultura. Es en la excavación, conforme se va vaciando la estancia y eliminando esa tierra, cuando estas partes del estuco fracturado comienzan a desprenderse.



Fig. 4.18 Colonización de macro y micro flora sobre las ruinas en la zona expuesta a la intemperie. En la zona que quedó bajo sepultura se observan grietas, fracturas y desprendimiento del estuco. Fig. 4.19 Detalle de zona de la bóveda que quedó expuesta y que ha sido atacada por microorganismos y por acciones antrópicas.

### *Producidas tras la exhumación.*

A partir del momento de la excavación, los materiales compositivos del estuco y también del soporte pétreo comienzan un proceso de deterioro rápido, a causa de la ruptura de las condiciones ambientales (humedad, temperatura, luz y oxígeno), relativamente constantes, que se habían conseguido durante cientos de años de sepultura y en las que dichos materiales se habían estabilizado.

Desde que se excavara el primer cuarto de la Acrópolis en 2005, se ha estado realizando un seguimiento anual sobre los estucos liberados, registrando cada nueva patología, y por supuesto estudiando las causas de su origen para poder intervenir sobre ellas. Las principales patologías halladas tras la excavación son:

#### *Concreciones terrosas*

Al comenzar a eliminar a tierra de relleno, los depósitos terrosos y de material pétreo quedan adheridos sobre las superficies estucadas. Por la acción de la humedad presente en este contexto y la presión del peso del relleno, esta tierra así como restos de piedras u otros compuestos que se encuentran junto a los revestimientos, van adhiriéndose superficialmente y rellenando las deformaciones, grietas u oquedades que éstos puedan tener.

#### *Eflorescencias*

La primera patología alarmante que estas superficies presentan durante su adaptación al nuevo medio es la exudación de sales solubles, especialmente de sulfato de calcio (Fig. 4.21). Este hecho se pudo apreciar ya en el primer cuarto excavado (6J2-4), en la campaña de trabajo siguiente (Carrascosa y Lastras 2007:31). Con el aumento de la temperatura, la evaporación del agua contenida en los materiales arrastra hacia el exterior diferentes compuestos presentes en la estructura interna, tanto del estuco como de su deteriorado



soporte: la piedra caliza. Estos compuestos se muestran en forma de pátina superficial blanca y opaca, que puede llegar a tener hasta 3mm de grosor. Generalmente se localiza en las franjas inferiores de los revestimientos de estuco, a una altura entre 0,40 y 1 m, si bien en algunos casos se puede hallar a más altura.

Este fenómeno se ha registrado en todas las estancias de la Acrópolis, no inmediatamente después de la excavación, sino a partir del año siguiente a la excavación, si bien el grado de concreción puede variar. Se han hallado importantes pátinas de sulfato de calcio en las sucesivas campañas, en las estancias de todas las áreas de la Acrópolis, si bien las del ala sur presentan un grado mayor de concreción.

Aunque esta pátina sea un depósito superficial, fácilmente eliminable mediante un cepillado, el hecho de que se produzca año tras año, demuestra que el material calizo está siendo dañado a nivel interno como consecuencia de la continua migración y arrastre de estas sustancias. En los análisis efectuados a tal caso sobre muestras de estas exudaciones de los cuartos 1, 2, 3 y 4 del ala sur, la espectroscopia por FT-IR revela que se trata de compuestos de sulfato de calcio principalmente, carbonato cálcico, cloruros y nitratos (Osete, Kröner y Doménech 2010) (Anexo 1), que exudan constantemente a través de la porosidad de los materiales, depositándose en la superficie del estuco, y en la superficie pétreo, por debajo del revestimiento produciendo su disgregación.

### *Descamaciones y pulverulencia*

Otras patologías de graves consecuencias son las zonas de estuco pulverulento y las zonas con visibles descamaciones superficiales. Ambos daños son un reflejo de la desintegración de la estructura del material calizo que compone tanto el estuco como la piedra que le sirve de soporte.

Estas dos patologías suelen ir acompañadas, y se dan de forma más intensa en las zonas bajas de los revestimientos, en una franja de aproximadamente 30-40 cm desde el nivel del suelo. Se han detectado en todas las estancias, aunque se halla de forma más intensa en el muro norte del cuarto 6J2-4, en la esquina suroeste del cuarto 6J1-5 o en el muro este de 6J2-16, donde gran parte del revestimiento que se halló en la excavación se ha desprendido (Fig. 4.20-4.22).

### *Desprendimientos*

La principal patología que presentan estos estucos al ser liberado, es un porcentaje de la superficie desaparecida. La pérdida parcial de áreas de estuco pudo haberse producido durante el tiempo de abandono y decadencia de las estancias, afectado por los agentes medioambientales, quedando sepultado por el derrumbe cuando ya se encontraba bastante deteriorado.

También se producen desprendimientos de partes del estuco en el momento de la excavación. Conforme el relleno se va eliminando, es frecuente observar fragmentos de estuco que habiéndose fracturado en el periodo de sepultura (por crecimiento de raíces o asentamiento del edificio), se han mantenido sujetos en el lugar gracias a la tierra del relleno y a las raíces crecidas sobre ellos.

### Concreciones biológicas

Generalmente, los estucos que han permanecido en ambiente de sepultura no presentan daños derivados de la acción biológica. Estas patologías comienzan a estar patentes tras la excavación, sobre todo si coincide con época de lluvias y si las estancias no cuentan con una cubierta inmediata. Es fácil hallar concreciones de microorganismos en las zonas externas de las estancias, donde el agua de lluvia ha podido incidir de manera directa, penetrando en el paramento. Esto supone la aparición de pátinas microbianas en cuestión de pocos días.



Fig. 4.20 Escamación y pulverulencia progresiva del estuco. Fig. 4.21 Eflorescencias en forma de velos blanquecinos tras la excavación del cuarto. Fig. 4.22 Separación del estuco del soporte por pulverulencia de la piedra caliza. Fig. 4.23 Aparición de fuertes concreciones biológicas y eflorescencias por entrada de agua en el cuarto 6J1-5.

Pero los efectos más dañinos que producen los microorganismos sobre los revestimientos de estuco se derivan de los daños producidos en las cubiertas de protección. Estas cubiertas están realizadas con hoja de palma<sup>13</sup> y su durabilidad es limitada (Tabla 4.3). Cuando una sección de esta cubierta comienza a podrirse, el agua de lluvia se filtra a través de los orificios producidos, incidiendo sobre los paramentos y suelo del interior de las estancias. La aparición de pátinas verdosas en las zonas de incidencia de agua es inmediata, y además provoca manchas de escorrentía en los revestimientos por arrastre de tierra de las zonas altas de los muros (Fig. 4.23).

<sup>13</sup> Estas cubiertas se realizan generalmente con hoja de Guano (*Sabal morrisiana*), una especie de palmera originaria de las regiones tropicales de América, con las que se realizan principalmente los techados de las casas vernáculas. Aunque esta hoja es muy resistente, a menudo se emplea la palma de corozo (*Orbyignia cohune*).

Tabla 4.3: Relación de los tipos y duración de las cubiertas que han protegido a las estancias desde su excavación.

ÁREA	CUARTO	AÑO EXC.	CUBIERTAS									
			2005	2006	2008	2009	2010	2011	2013	2015		
6J2 Ala sur	4	2005	Palma		Palma				Palma	Palma		
	1	2005	Palma									
	2	2005	Palma									
	3	2005	Plástico	Palma								
	6	2006		Palma								
	7	2008			Palma							
6J2 Ala oeste	8	2009				Palma			Palma	Palma		
	9	2009				Palma						
	10	2009				Palma						
	11	2009				Palma						
6J2 Ala norte	13	2010					Plástico		Palma			
	14	2010					Plástico					
	15	2010					Plástico					
	16	2008			Plástico							
	17	2010					Plástico					
	18	2010					Plástico					
6J1 Ala este	1	2008			Plástico			Palma				
	2	2008			Plástico							
	3	2006		Palma							Palma	
	4	2009					Plástico					
	5	2009					Plástico					

#### 4.2.4.3 Seguimiento periódico del estado de conservación

##### *Ala sur de la Acrópolis*

Es el sector con mayor tiempo de exposición a la intemperie desde su excavación en 2005. Su progresión conservativa a lo largo de once años de labores de mantenimiento es bastante buena, si bien se han producido algunos daños importantes derivados fundamentalmente del estado de conservación de las cubiertas de protección. Así pues, las patologías que se hallaron tras la excavación (Punto 4.1.4.2), fueron mitigadas en gran medida en la siguiente campaña de trabajo 2006 (Carrascosa y Lastras 2007); quedando limpios de agentes dañinos y estabilizados los estucos sobre su soporte pétreo. A partir de la siguiente campaña de trabajo (2007), se empezó a observar las exudaciones de sulfato de calcio sobre las superficies de los estucos, en forma de gruesa capa de polvo blanquecino. El estado de los estucos de este sector, se vio empeorado a partir de 2008, a consecuencia de dos factores importantes. Por un lado, la liberación del cuarto 6J2-7, adosado a 6J2-4 por su muro norte. Por otra parte, el deterioro significativo de las cubiertas de cada una de las estancias del ala.

La excavación del cuarto 6J2-7 ocasionó la desprotección del muro norte de 6J2-4, creándose un acceso rápido del aire caliente, acelerando la evaporación del agua contenida en el interior del muro y originando la producción de ciclos de cristalización de sales. En la temporada de campo 2009, este muro presentaba dos importantes franjas de deterioro, una a un altura de entre 20 y 50 cm sobre la banqueta central, y otra a entre 2 y 2,50m de altura de este muro norte. En ambas zonas, eran patentes laminaciones y abolsamientos del estuco y una fuerte pulverulencia del soporte pétreo subyacente.

Los cuartos 1, 2, 3, 5, 6 y 7, se han mantenido constantes en el tiempo, destacando las continuas exudaciones de sulfato de calcio, presentes en todas las estancias y manchas por escorrentía y actividad biológica, derivada de filtraciones en las cubiertas. En la campaña 2013, se registraron importantes daños en casi todas las estancias de esta área, especialmente en los cuartos 3, 4, 6, y 7, en los que observaron fuertes concreciones biológicas, por la proliferación de distintos microorganismos que dañaron los revestimientos con pátinas de coloración negro-verdosas. Estos daños se debieron al deterioro de las cubiertas por las que se estuvo filtrando el agua de lluvia, incidiendo sobre los paramentos de las estancias (Fig.4.24). Además, la acumulación de agua en las partes bajas de los muros, provocó abolsamientos, laminación y pulverulencia del estuco y del soporte pétreo, viéndose un importante avance del deterioro con respecto a la campaña de 2011.



Fig. 4.24 Cuarto 6J2-3 en 2013 al crearse filtraciones en la cubierta deteriorada. Fotografía B. Carrascosa. Fig. 4.25 Cuarto 6J2-3 en 2016; después de limpiar las concreciones biológicas y reponer la cubierta, los estucos se mantienen en buen estado. Fig.4.26 Cuarto 6J2-7 en 2013 fuertemente atacado por microorganismos. Fig. 4.27 Cuarto 6J2-7 en 2016, tras la limpieza y reposición de cubierta, se han revertido las concreciones, manteniéndose hasta la fecha en buen estado.

Al final de la campaña de 2013 se renovaron las cubiertas de estas estancias construyéndose una cubierta continua que acogió a todos los cuartos. De este modo, en las sucesivas campañas de trabajo, 2015 y 2016, se pudo observar cómo después de los tratamientos de limpieza y consolidación efectuados, estas graves patologías se han mantenido estables y no se han vuelto a registrar filtraciones en las cubiertas (Fig.4.24-4.27).

### *Ala este de la Acrópolis*

El Palacio Oriental (6J1), independiente de 6J2, ha permanecido estable en el tiempo de exposición a la intemperie, si bien cuenta con varios periodos de excavación, desde que se comenzó con el cuarto 3 en 2006. Su característica arquitectura, con el muro este que cierra el edificio por este lado, muy expuesto a las lluvias, ha intervenido negativamente en el deterioro de las estancias que lo componen, y por ende en los revestimientos de estuco hallados. Mientras los cuartos 2 y 4 apenas han variado en su estado (el primero por hallarse cubierto con su propia bóveda y el segundo por no conservar apenas estuco), las estancias 1, 3 y 5 se han visto dañadas a partir de la campaña siguiente a su descubrimiento.

En 2008, se registró una importante mancha de humedad en el muro este del cuarto 3, que afectaba a la zona donde se encuentran los grafitos más representativos de La Blanca, debido a las fuertes lluvias de la temporada que se filtraron a través del muro ciego de esta orientación, y a través de la deteriorada cubierta. Como consecuencia se habían comenzado a producir eflorescencias en forma de velo blanquecino, algunos abolsamientos, laminaciones y separación de anteriores rebordes de refuerzo en las franjas bajas de los revestimientos del muro este y del muro sur. En 2010, las cubiertas provisionales que tapaban estos cuartos, fueron sustituidos por una cubierta continua que abarcaba los cinco cuartos. Este hecho fue decisivo para la mejora del estado de los revestimientos del cuarto 3, que se secaron de forma gradual estabilizándose y mitigándose la aparición de exudaciones y la pulverulencia en las zonas bajas. En 2013, el muro norte de esta estancia se vio fuertemente afectado por una filtración de agua que impactaba directamente sobre la zona alta del paramento, produciendo una fuerte mancha de escorrentía con depósitos terrosos muy concrecionados. Esta fuente de humedad produjo el ataque de microorganismos en forma de pátinas de tonalidades verdosas sobre las zonas altas del revestimiento.





Fig. 4.28 Secuencia: Esquina suroeste del cuarto 6J1-5 en 2013, 2015, 2016 y 2018. Debido a la exposición de este cuarto, es continua la acumulación de agua de lluvia y la radiación solar en esta zona. Se aprecia como el poco estuco presente en 2013 comienza a desprenderse a pesar de los refuerzos, habiendo desaparecido para el último año, mostrando un avanzado estado de pulverulencia el soporte pétreo.

En la parte baja de esta zona se produjeron grandes abolsamientos del estuco y desprendimientos de pequeñas partes por la acumulación del agua de lluvia caída. A pesar de las acciones de conservación, estos daños siguieron produciéndose hasta 2015, año en el que se pudo renovar la cubierta.

El cuarto 5 de este edificio ha sufrido también importantes daños debido a su situación de exposición ambiental. Este cuarto carece de casi la totalidad de su muro este, dejando una extrema abertura entre el nivel del piso y la elevada cubierta. Este espacio ha servido de entrada directa al agua de lluvia, que ha ido acumulándose especialmente en el muro este, la banqueta central y la banqueta lateral sur. A partir de 2011, los revestimientos de estos elementos comienzan a mostrar importantes pátinas biológicas de coloraciones verdosas y negras. Se registra también un alarmante estado de pulverulencia, descamaciones y concreciones biológicas en el estuco de la esquina suroeste, a una altura de 30cm del nivel del suelo, resultado del agua absorbida por capilaridad desde el suelo y la cristalización repetida de sales (Fig. 4.28). Cabe señalar que este área de estuco se halló en la excavación con signos de quemado, por lo que su resistencia mecánica ya estaba mermada, haciéndolo más vulnerable a los agentes de deterioro. Esta patología ha seguido desarrollándose con el tiempo, registrándose en 2016 una pérdida significativa del estuco.

### *Ala oeste de la Acrópolis*

Este sector de la Acrópolis se caracteriza por el buen estado en el que se han mantenido los revestimientos desde el momento de su exhumación, debido principalmente a la construcción de una correcta cubierta inmediatamente después a la excavación. Después de la revisión y tratamiento de las patologías presentes tras la excavación, los estucos de estos cuartos no han presentado variaciones severas en las siguientes campañas de trabajo. Cabe destacar la campaña de 2013, en la que detectaron algunas filtraciones producidas por el deterioro de la cubierta original, realizada en 2009. Estas filtraciones provocaron la aparición de pátinas de microorganismos principalmente en los muros sur y este del cuarto 9, y en el muro oeste del cuarto 10 (Fig. 4.29).

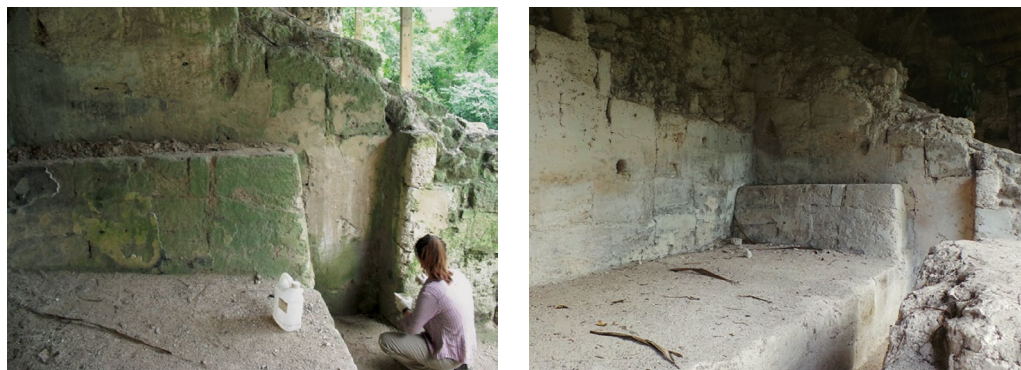


Fig. 4.29 Muro sur del cuarto 6J2-9 en 2013, con presencia de fuertes concreciones biológicas por fallos en la cubierta, y en 2018, tras la limpieza físico-química anual y reposición con mantenimiento de la cubierta.

Asimismo, la acumulación de agua por dichas filtraciones en las zonas bajas de estos muros, provocó también un aumento de eflorescencias de sulfato de calcio, zonas de laminación del estuco y pulverulencia del soporte pétreo, en las franjas bajas de los revestimientos; especialmente en los muros este de los cuartos 8, 9 y 11. Con la renovación de la gran cubierta en 2013, las patologías descritas se fueron mitigando, no habiéndose registrado nuevas patologías desde entonces.

### *Ala norte de la Acrópolis*

Las estancias que componen parte del sector meridional de la Acrópolis (13, 14, 15, 17 y 18), fueron los últimos en ser excavados. Esta condición de “recién exhumados” junto al hecho de que se realizara relativamente pronto una cubierta correcta, ha favorecido el buen comportamiento de estos revestimientos, mostrándose prácticamente igual desde que fueran intervenidos tras la excavación. Los revestimientos de estas estancias han mostrado signos de pulverulencia leve y eflorescencias en forma de pátina blanquecina en las franjas bajas de los muros, especialmente en las estancias más amplias, 14, 17 y 18.

Cabe mencionar el caso del cuarto 16, que siendo el cuarto central del ala, su excavación se realizó dos años antes (2008) que el resto de estancias. Este cuarto fue cubierto de forma provisional con plástico negro, pero se mantuvo de este modo hasta 2011, cuando se construyó la cubierta que alberga todas las estancias de este sector. La mala cobertura que supone este material, ya que se asienta sobre la propia ruina, propició la entrada de agua procedente de lluvia, así como la incidencia de los rayos del sol. En la campaña siguiente a su exhumación, ya se registraron las primeras exudaciones de sulfato cálcico en forma de gruesa pátina blanca y el principio de zonas pulverulentas en la franja baja del muro este. En 2010 y 2011, esta situación siguió incrementado, produciéndose pequeños desprendimientos de estuco pulverulento, a pesar de los tratamientos de consolidación efectuados las anteriores campañas. A partir de la cubierta realizada en 2011, este cuarto se ha estabilizado sin presentar más desprendimientos, aunque siguen produciéndose fuertes exudaciones de sulfato cálcico.

### 4.2.5 Causas de alteración

Las patologías que se han desencadenado en los soportes murales de la Acrópolis de La Blanca, atienden a una serie de causas específicas, condicionadas especialmente por las características medioambientales y edafológicas propias del lugar. Por estar indispensablemente asociados el estuco con la arquitectura y por poseer composiciones químicas similares, los mecanismos de deterioro y el desarrollo de las patologías suponen un complejo mecanismo del que, tanto el uno como el otro forman parte.

Si bien las causas de deterioro que se exponen a continuación afectan y degradan los revestimientos de estuco, los efectos más dañinos que sufren proceden de la descomposición de su soporte. Este material calizo se muestra fuertemente afectado por el intemperismo, mostrando graves patologías de las cuales, la alveolización, estratificación, y desintegración son las más alarmantes. El grado de influencia de los agentes de deterioro sobre el material pétreo es considerablemente mayor que sobre los estucos, trasladándose a menudo a éstos, sobre todo en el caso de la cristalización de sales. Este mecanismo es patente *in situ* pudiéndose observar en gran parte de las estancias cómo el material pétreo subyacente se encuentra en un avanzado estado de alteración, mientras el estuco superpuesto se mantiene considerablemente mejor. Incluso se han observado pequeñas zonas donde el estuco se mantiene firme con la ausencia de su soporte pétreo, ya desintegrado (Fig.4.30).



Fig. 4.30 Cuarto 6J2-6; detalle de zona del paramento donde se ha perdido el soporte pétreo y el estuco sigue firme.

A continuación se exponen las principales causas de alteración y sistemas de deterioro registradas en caso de La Blanca; que son extrapolables a otros sitios arqueológicos de las Tierras Bajas mayas del sur. Para facilitar el estudio, se han clasificado atendiendo a su naturaleza física, química, biológica y antrópica.

#### 4.2.5.1 Causas físicas

##### *El agua*

Podría decirse que el agua es el agente de deterioro más importante ya que genera por sí sola o en combinación de otros agentes gran cantidad de daños en los elementos calizos, pudiendo



desencadenar reacciones químicas y ataques biológicos. Debido a la naturaleza polar del agua, es atraída por las superficies hidrófilas y absorbida por los pequeños poros o grietas de la superficie.

La higroscopicidad que caracteriza a estos materiales calizos, favorece la continua absorción de agua, en fase de vapor, procedente de la humedad atmosférica, estableciendo un equilibrio dinámico entre ésta y su propio contenido de humedad. Este efecto de absorción-eliminación de agua se produce dentro de unos límites, determinados por el contenido de humedad en el equilibrio (EMC), que expresa la cantidad de humedad contenida en el material, cuando éste alcanza el equilibrio con el ambiente. (San Andrés y De la Viña, 2009: 368). Estas continuas variaciones provocan modificaciones en la forma y dimensión del material, produciendo tensiones mecánicas.

En estos materiales calizos, el tamaño y forma de los poros varía, pudiéndose establecer dos categorías: los poros grandes, con un diámetro de más de 10  $\mu\text{m}$ , y los poros capilares con un diámetro entre 1 y 0,1  $\mu\text{m}$ . Generalmente cuando un material adquiere agua, los poros capilares, de menor tamaño, se llenarán completamente de agua mientras que los grandes poros estarán parcialmente llenos de agua, permitiendo la entrada de aire en su interior.

El acceso del agua hacia los paramentos de las ruinas puede darse de varias formas dependiendo de la procedencia del agua. De forma directa, el agua puede penetrar en los muros a través de la lluvia, incidiendo con fuerza y penetrando en el interior de la red porosa del material. La incidencia de agua sobre el material pétreo y las superficies revestidas de estuco repetidamente, provoca además, erosión y manchas por escorrentía, al arrastrar tierra y depósitos orgánicos de las zonas superiores de los muros.

Otro posible modo de penetración del agua es mediante condensación. Este fenómeno se produce por la diferencia de temperatura entre el muro y la humedad ambiental, ocurriendo en mayor medida en materiales con mayor densidad y conductividad térmica. La condensación produce que el agua se deslice por la superficie de los paramentos, ocasionando de nuevo erosión sobre éstos.

Pero la forma más dañina en la que el agua actúa sobre los materiales del patrimonio, y concretamente en el caso de estudio, es por capilaridad. Este fenómeno es el resultado del ascenso y descenso de un líquido en el interior de los poros del material, y se debe a la presencia de fuerzas interfase entre sustancias sólidas, líquidas y gaseosas en contacto, denominadas tensión superficial (Kröner *et. al* 2010).

En materiales porosos, cuando la distancia entre las paredes de los poros es del orden de magnitud del micrón ( $\mu\text{m}$ ), la atracción hacia las paredes prevalece sobre la atracción entre moléculas de agua, permitiendo que el agua ascienda hasta alturas considerables. En el caso de muros en contacto con el suelo, el agua ascenderá por la red porosa hasta que se establezca un equilibrio cuando la cantidad evaporada a través de la superficie equilibre el consumo de agua desde el suelo (Torraca 2009:82).

El comportamiento del agua a través de la red porosa de los materiales y en función de las condiciones ambientales, determina el deterioro de dicho material dado que viaja acompañada de sustancias disueltas como las sales solubles y otros compuestos que pueden afectar gravemente e incluso destruir los enlucidos por la cristalización repetida de sales y las reacciones químicas desencadenadas entre otros compuestos y los materiales pétreos.

### Sales solubles

Cuando un ácido es neutralizado por una base o viceversa, se forman moléculas de agua con residuos iónicos. Cuando el agua evapora, estos residuos cristalizan, formándose una sal. Estos compuestos iónicos, tiene la capacidad de disolverse en agua y cristalizar al quedarse sin ella de manera continua; por lo que con facilidad entran en contacto con los paramentos adentrándose en la red porosa del muro. Existen diversas fuentes a través de las que los materiales (en este caso la piedra caliza y el revestimiento de estuco) pueden contaminarse con estas sales; por la polución ambiental, por formación en los suelos, transportadas por el viento o contenidas en los propios materiales de construcción, entre otras. En el caso de La Blanca, debido a su aislamiento natural, con mayor probabilidad las sales que afectan a los paramentos no proceden de un ambiente contaminado, sino que entran en contacto con éstos a través del agua absorbida desde el suelo por capilaridad.

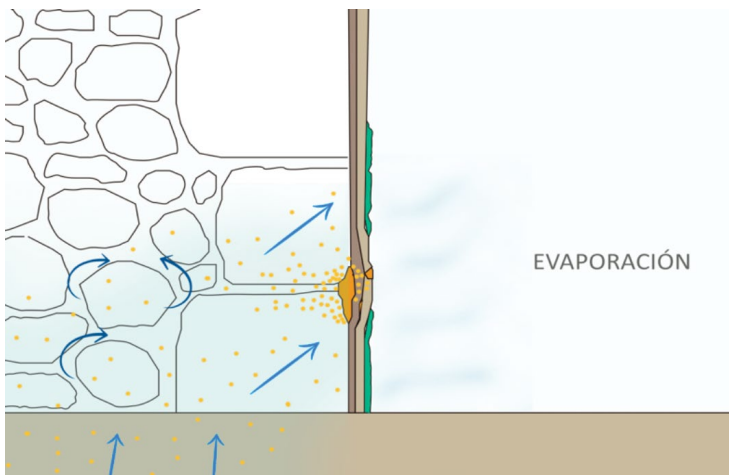


Fig.4.31 Esquema del proceso de cristalización de sales en los materiales calizos; con formación de eflorescencias (verde) y sub eflorescencias (amarillo).

Las sales pueden ser estables en condiciones ambientales constantes pero si éstas no lo son, se producirán fases de evaporación, donde el agua contenida en el interior de los muros, tenderá a salir a la superficie arrastrando con ella a las sales disueltas. Cuando las sales pierden el agua se produce la cristalización.

Si la cristalización tiene lugar en la superficie del material formará una pátina de eflorescencias sobre ésta, que no resulta dañina para el material pues no ejerce ningún tipo de estrés mecánico. Por el contrario, el proceso más dañino se da cuando se producen subeflorescencias debido al crecimiento interno de los cristales de sal (Fig. 4.31). La prevalencia de uno u otro proceso viene determinado por las condiciones ambientales que rodean al material afectado. Las eflorescencias tienen lugar en ambientes con temperatura moderada, alta humedad y viento suave, que favorece una evaporación lenta y gradual, permitiendo que la solución salina salga al exterior y cristalice sobre la superficie (Fig. 4.32). Por el contrario, si el ambiente es muy cálido, seco y con fuertes vientos, favorecerá una evaporación rápida y la cristalización interna de las sales (Torraca 2009). El crecimiento de estos cristales en el interior de los poros genera tal estrés capaz de superar la resistencia a la tracción de la piedra o estuco (Doehne y Price 2010:15) (Fig. 4.33). Las subeflorescencias de aquellas

sales susceptibles de varios estados de hidratación<sup>14</sup> son las más peligrosas ya que al aumentar la humedad, el crecimiento de volumen ejercerá una fuerte presión sobre las paredes de los capilares, llevando a la rotura de éstas. Este proceso cíclico producirá la arenización del material bajo una costra dura superficial que terminará por desprenderse (Mas-Guindal *et.al* 1999:179).



Fig.4.32 Evaporación de humedad con aparición de eflorescencias sobre el estuco de la esquina suroeste de 6J2-18, que presenta abertura y separación de ambos muros por carga estructural. Fig.4.33 Sub-eflorescencias entre estratos del estuco que han provocado la desintegración y desprendimiento de la primera capa.

Un ambiente húmedo puede transportar cientos de litros de humedad por año por metro lineal de piedra (Hall, Hoff y Hamilton 2008, citado en Doehne y Price 2010). Asimismo puede estar continuamente alimentado por humedad salina procedente del subsuelo, acumulándose y cristalizando las sales constantemente en el punto de evaporación (Lewin 1982); provocando una zona de gran tensión mecánica donde se genera el comienzo de la disgregación del material calizo.

Las sales que con más frecuencia afectan a estos a morteros y a la piedra caliza son el sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), sulfato de calcio hidratado (yeso) ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4$ ). También es común encontrar cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ), nitrato de sodio ( $\text{NaNO}_3$ ) y nitrato de potasio ( $\text{KNO}_3$ ). Como se expuso anteriormente, en el caso de La Blanca, la cristalización de sales producida en la superficie de los revestimientos (eflorescencias), se compone prácticamente de sulfato de calcio, mientras que en áreas más internas del soporte pétreo se hallan además otras sales de calcio como cloruros y nitratos (Anexo 1).

En rocas sedimentarias estratificadas el agua se transmite principalmente a través de las capas que son ricas en poros capilares. En la superficie de estas capas definidas es donde tiene lugar la cristalización de sales. Este proceso se ve incrementado por la acción del viento que va erosionando estas franjas al introducirse en las cavidades creadas y formar pequeños remolinos

<sup>14</sup> En algunos casos, se mantiene una cierta cantidad de agua dentro del cristal de sal en crecimiento, unida a los iones en una proporción precisa, formándose de este modo una sal hidratada. En términos de deterioro, estas sales hidratadas son más dañinas que las sales simples ya que sus cristales ocupan mayor volumen y pueden crecer más rápidamente si las condiciones ambientales son favorables (Torraca 2009:27). Un ejemplo de sal hidratada es el sulfato de sodio que puede presentarse como una sal anhidra (thenardita  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) o como sal decahidratada (Mirabilita ( $\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )). La thenardita aumenta su volumen más de tres veces para formar mirabilita (Doehner y Price 2010:15). Esta sal alojada en el interior del estuco o soporte pétreo, sufrirá ciclos continuos de hidratación, deshidratación y disolución, ocasionando estrés mecánico en la porosidad del material en cada fase.

(Torraca 2009). El resultado es una superficie pétreo con estratificaciones definidas por la erosión y pulverulencia del material.

Este daño queda patente en varias zonas de los revestimientos internos de la Acrópolis, sobre todo en franjas bajas de los muros, donde se observa como se está formando esta estratificación, produciendo la pulverulencia y desprendimiento del estuco superpuesto. En otros casos, el grado de estratificación está mucho más avanzado, habiéndose perdido por completo el estuco. Este fenómeno ocurre de forma aislada sólo en aquellos sillares realizados con piedra estratificada, por lo que en una misma superficie se pueden hallar zonas en buen estado, y zonas correspondientes al perímetro de un sillar determinado, afectadas por dicha patología.

### *Expansión térmica*

Los materiales constructivos porosos se caracterizan por ser rígidos, duros y frágiles debido a su estructura química de fuertes enlaces covalentes que impiden la deformación plástica de sus cristales, por lo que ante esfuerzos de tensión, el material no deformable, se romperá en los puntos de mayor esfuerzo. El deterioro por estrés diferencial puede venir dado por distintos mecanismos como los ciclos de humedad y secado, diferencias hídricas o diferencias de expansión térmica (Doehne y Price 2010).

Los cambios de temperatura en los materiales pétreos y los estucos se traducen en variaciones de su volumen por los efectos de contracción y dilatación. Durante el día, los materiales absorben la energía de la radiación solar, compuesta por luz ultravioleta (UV) y radiación infrarroja (IR), produciéndose la expansión o dilatación del material. Durante la noche, esta energía es expulsada mediante radiación infrarroja hacia la atmosfera, produciéndose la contracción y enfriamiento del material. En materiales poco conductores del calor, como la piedra, el estrés entre la superficie y el interior es continuo, ya que se producirá tanto durante la fase de calentamiento como en la fase de enfriamiento del ciclo (Torraca 2009). Las tensiones generadas se ven acentuadas entre las zonas sombreadas y las expuestas al sol, produciéndose el cuarteamiento y arenización de la piedra (Arnaiz *et.al* 1977; citado en Kröner *et.al* 2010) citado en (Kröner *et.al*, 2010). Además los carbonatos son fuertemente anisótropos, lo que se traduce en coeficientes de dilatación térmica muy distintos según la orientación (Mas-Guindal *et.al* 1999: 177) y exposición al calor.

Algunos componentes depositados en la superficie del material, como sales, pátinas de microorganismos, depósitos orgánicos o productos empleados en tratamientos de restauración, pueden alterar el comportamiento de esta superficie y provocar tensiones diferenciales entre la superficie y el interior del material calizo, induciendo a la formación de descamaciones, grietas y desprendimiento paralelo del material. Un ejemplo son las sales<sup>15</sup> que tienden a depositarse en la superficie, marcando dos comportamientos diferentes entre la superficie de la piedra o estuco y su interior. Los depósitos orgánicos presentes en los poros del material, o productos empleados como consolidantes, pueden expandir mucho más rápido que el material calizo en condiciones de humedad, debido a diferentes coeficientes de expansión térmica.

<sup>15</sup> El cloruro de sodio expande aproximadamente cinco veces la tasa de la calcita a temperaturas superficiales, por lo que sería un ejemplo de expansión térmica diferencial involucrada en el deterioro de la piedra caliza (Smith *et.al* 2005).

### *Acción del viento*

El viento es muy nocivo debido a las partículas sólidas que arrastra, ya que impactan contra la superficie de los paramentos erosionándola debido a la acción mecánica que ejerce sobre las superficies, produciendo un desgaste por abrasión. El grado de daño vendrá determinado por el tamaño de la partícula en suspensión y por la fuerza cinética del viento.

La velocidad del viento, por otra parte, puede ocasionar el secado rápido de los muros que contiene agua, desencadenando la cristalización de sales solubles en el interior de la red porosa del material y aumentando la destrucción de la estructura interna por las tensiones mecánicas producidas con la cristalización en ciclos repetidos. El transporte de semillas y materiales orgánicos que se depositan en los poros u oquedades del material deteriorado, puede contribuir también a la proliferación de microorganismos, plantas mayores y anidamiento de animales.

En zonas cercanas al mar, las partículas de cloruro de sodio transportadas por el viento, impactan en los paramentos, cristalizando en los poros y haciendo saltar el material pétreo en escamas, comenzando el ciclo de la alveolización. La presencia de una fuerte alveolización con pérdida de material, se debe a la existencia de elevada porosidad de pequeño tamaño y alto contenido en sales solubles, combinado con la acción del viento en contacto con el soporte pétreo (Pauly 1976 citado en Kröner *et.al* 2010). Es por ello que la porosidad del material está estrechamente ligado a la acción destructiva de las sales; siendo más agresiva cuanto mayor sea el número de poros de menor tamaño.

Este mecanismo de deterioro ha afectado gravemente al material pétreo de la arquitectura de la Acrópolis, hallándose de forma más desarrollada en las zonas externas de los cuartos como son los muros que forman los vanos de acceso, donde prácticamente es imposible hallar restos de estuco (Fig. 4.34). En el interior de las estancias sin embargo, se observan zonas de alveolización en el material pétreo sobre todo en las franjas altas de los muros; pero también en áreas centrales y bajas donde el estuco permanece firme. Este hecho es apreciable en todas las estancias de la Acrópolis sin excepción, manifestándose como pequeñas cavidades emergentes en la superficie del estuco (Fig. 4.36).



Fig. 4.34 Degradación de la piedra caliza con marcada erosión, que ha provocado el desprendimiento del estuco. Fig. 4.35 Estratificación diferencial de los sillares en las franjas bajas de los muros. Fig. 4.36 Principio de alveolización del material pétreo que se va abriendo paso hacia la superficie estucada.

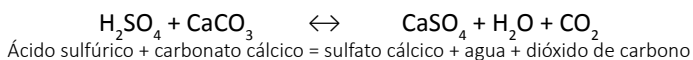
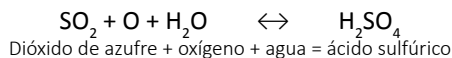
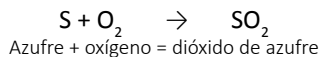
Del mismo modo, se detectan también las zonas de unión de los sillares que se muestran como líneas verticales y horizontales de erosión sobre el estuco (Fig. 4.35). Además del efecto de la cristalización de sales en el interior de la piedra, el viento fue determinante en la formación de estos alveolos dado el carácter erosionado de las superficies; producido en mayor grado probablemente durante el periodo de abandono de la ciudad, antes y durante el colapso de la arquitectura. Esta teoría se ve reforzada por el hecho de que las estancias de mayor tamaño, y por lo tanto más expuestas a la acción del viento son las más afectadas (6J2-1-4, 8-11, 14-18); mientras que las de menor tamaño o más resguardadas no presentan apenas el efecto de la alveolización, como ocurre con el Palacio de Oriente (6J1-1, 2, 3,5), que se encuentra protegido por el edificio 6J2 (norte, oeste y sur) y por su propio muro ciego en la zona oriental.

#### 4.2.5.2 Causas químicas

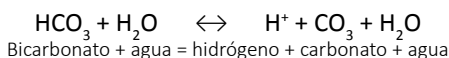
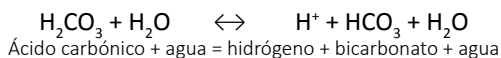
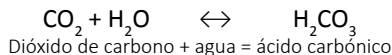
##### *Presencia de ácidos*

Los estucos y el soporte pétreo, son materiales calcícticos susceptibles a los ácidos. El carbonato cálcico, componente principal de la calcita, es un cristal iónico insoluble en agua debido a su fuerte atracción entre el ion calcio ( $\text{Ca}^{++}$ ) y el ion carbonato ( $\text{CO}_3^-$ ), que tiene una doble carga eléctrica. De este modo, aunque la solubilidad de la calcita por disociación en agua pura (pH7) es muy baja, no ocurre lo mismo cuando ésta se encuentra acidificada. El ion hidrógeno ( $\text{H}^+$ ), liberado de un ácido disuelto en agua, elimina un átomo de oxígeno del ion carbonato, formando una molécula de agua y transformando así el ion carbonato en dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), un gas que forma burbujas en el líquido (Torraca 2009: 23).

En contextos urbanos, los materiales que componen edificios y monumentos patrimoniales, pueden verse afectados por diferentes ácidos, procedentes de reacciones químicas, cuyo origen parte de los residuos producidos por la contaminación atmosférica. Un ejemplo es el dióxido de azufre, procedente principalmente de la industria, que en combinación con partículas de agua, da origen al ácido sulfúrico actuando sobre el carbonato de calcio, descomponiéndolo y formando sulfato de calcio (yeso), mediante la siguiente reacción:



El dióxido de carbono, es un gas presente de forma natural en la atmósfera en una concentración muy baja. En contacto con la humedad de la atmósfera, se transforma en ácido carbónico mediante la siguiente reacción:



Los minerales carbonatados son altamente solubles durante la hidratación del  $\text{CO}_2$ . Al formarse el ácido y entrar en contacto con los compuestos calcíticos, se transforman los carbonatos presentes en la roca en bicarbonatos, solubles en agua. El proceso se completa con la recristalización de los carbonatos en nuevas formas cristalinas. La concentración de  $\text{CO}_2$ , también presente en los suelos, se incrementa por la respiración de plantas, fauna del suelo, microfauna y microflora, principalmente bacterias, actinomicetos y hongos. Estos organismos además de incrementar la cantidad de  $\text{CO}_2$  producen ácidos orgánicos y agentes quelantes<sup>16</sup> que incrementan la disolución de los carbonatos (Straulino 2012).

Este proceso de disolución química junto a los ciclos de cristalización de sales, son los principales responsables de la desintegración de los materiales calcíticos que componen los revestimientos de La Blanca. La presencia de laminaciones y pulverulencia, especialmente en la piedra caliza, es una patología extendida en las Tierras Bajas mayas del sur, que se puede localizar en la mayoría de sitios arqueológicos. Este efecto ha sido reportado en numerosos informes de campo y artículos de investigación (Gómez 2004; Straulino 2012; Ramírez de León 2006), siendo un grave problema para la conservación de estos materiales calcíticos expuestos a las duras condiciones ambientales del clima tropical.

<sup>16</sup> La palabra quelante procede del griego *Chelae*; referido a la terminación en forma de pinza de un apéndice en un artrópodo. Este símil hace referencia a la forma en que estos agentes quelantes se comportan, ya que son sales de ácidos orgánicos que tienen muchos grupos ácidos (-COOH) en cada molécula, capaces de quitar átomos metálicos de incrustaciones inorgánicas insolubles (Como concreciones calcáreas o pátinas de corrosión en metales). Los múltiples grupos ácidos de estas moléculas actúan como las tenazas de un cangrejo, agarrando átomos uno a uno y disolviéndolos. Son agentes quelantes el EDTA (sal disódica del ácido etileno-di-amino-tetra-acético) o el citrato de amonio (Torraca 2009:29).

### 4.2.5.3 Causas biológicas

#### *Microorganismos*

Las bacterias, hongos y algas son los principales colonizadores microbianos de los materiales calizos que constituyen las estructuras de los sitios arqueológicos en área maya. Los mecanismos de biodeterioro se deben, predominantemente, a procesos de biosolubilización; estos procesos involucran la producción de metabolitos ácidos provenientes de la actividad bacteriana y fúngica que pueden potenciar los efectos agresivos de la corrosión atmosférica (Videla *et.al* 2003).

El deterioro provocado por las bacterias es fundamentalmente químico; costras negras, pulverización y exfoliación, provocando la acidificación del medio y la pérdida de peso del material. Las bacterias que atacan químicamente el material pétreo son dos; las autótrofas, capaces de obtener el carbono del  $\text{CO}_2$  y la energía de la luz o de reacciones químicas redox (Dohner y Price 2010). Entre ellas juegan un papel importante las bacterias sulfooxidantes, que utilizan compuestos reducidos de azufre para producir iones sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), que al reaccionar con los iones calcio ( $\text{Ca}_2^+$ ) del sustrato forman yeso ( $\text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$ ) y las bacterias nitrificantes que producen en sus reacciones químicas ácido nítrico, provocando la disolución del carbonato cálcico. El otro grupo de bacterias son las bacterias heterótrofas que emplean compuestos orgánicos de la superficie pétreo para conseguir carbono. Producen agentes quelantes y ácidos orgánicos, que en contacto con los materiales calizos producen la disolución del carbonato cálcico.

Cianobacterias y algas, aunque son organismos muy distintos, suelen aparecer en los mismos sustratos y en condiciones semejantes. Las cianobacterias son procariontas que poseen una cubierta viscosa de diferente color que les permite retener agua. Las algas son organismos eucariotas y poseen clorofila. Se clasifican según el pigmento que acompaña a la clorofila y que le otorga el color característico; siendo feofíceas las de color pardo, clorofíceas las verdes y rodofíceas las de coloración rojiza. Ambos organismos se encuentran en ambientes acuáticos o con una humedad elevada, aunque a veces pueden adoptar formas de resistencia a las condiciones adversas. Se desarrollan en los lugares con mayor índice de humedad o agua retenida como en huecos o fisuras existentes, formando filas de escamas verdosas, incluso en huecos que ellas mismas crean, disolviendo el sustrato con los ácidos que producen (Valgañón 2008). Las pátinas que forman pueden variar de color según la luz y la humedad, siendo negras con mucha luz y poca agua y de vivos colores si las condiciones son al contrario. Además de retener agua, estas pátinas son fuente de sustancias orgánicas para otros microorganismos. Al morir, cianobacterias y algas constituyen el alimento necesario para el asentamiento de organismos heterótrofos como bacterias u hongos.

Los hongos son organismos pluricelulares, eucariotas, heterótrofos y se alimentan absorbiendo las sustancias que necesitan, que generan por descomposición de materia muerta o parasitando otros seres vivos (*ibid.*:158). Están constituidos por pequeños filamentos llamados hifas que ramificados forman el micelio, el cuerpo del hongo. Estos organismos requieren elevada humedad relativa para crecer, aunque pueden permanecer vivos en condiciones secas. Las condiciones óptimas para su desarrollo están entre los 25-30°C, prefiriendo poca luz y aire y un pH ácido. Suelen colonizar materiales pétreos en forma de manchas de diversas coloraciones y producir



daños considerables sobre estas superficies debido a la acción mecánica del propio micelio y a la disolución del carbonato cálcico con los ácidos que excretan en su metabolismo (Fig. 4.37).

Los musgos o hepáticas, son organismos eucariotas, pluricelulares y autótrofos, cuya fuente de energía son las sales minerales, el agua y la luz solar. Se asientan en superficies húmedas como el suelo, rocas o madera. Producen daños mecánicos sobre las superficies debido a la acción de sus estructuras que se anclan en el material y además permiten la penetración de agua hacia el interior del mismo. El principal problema de deterioro relacionado con los musgos viene dado por la materia orgánica que su presencia supone para el crecimiento de otras plantas vasculares de carácter más dañino.

El efecto de pulverulencia sobre un material pétreo a causa de los microorganismos ha sido ampliamente estudiado por Luisa Straulino (2012, 2015), llegando a la conclusión de que la presencia de cristales aciculares, poco cementados sobre la superficie pétreo y con efecto de pulverulencia, son debido a la disolución de la calcita provocada por el agua, agentes quelantes y ácidos orgánicos que excretan estos organismos, cuyas raíces provocan el entramado de estos cristales, en forma de celdas por un lado y en estructuras desordenadas de cristales aciculares largos y poco cohesionados, por otro.



Fig. 4.37 Concreciones microbiológicas sobre los estucos de las bóvedas que quedaron expuestas a la intemperie durante el periodo de abandono del sitio.

### *Plantas vasculares*

Entre las plantas mayores se destacan las especies herbáceas, arbustivas y arbóreas, de las que depende el tamaño de sus raíces. Generalmente crecen sobre áreas ya colonizadas por otros organismos, que sirven como alimento orgánico para su desarrollo. La vegetación que solemos encontrar en sitios arqueológicos de área maya es variada, siendo las especies arbóreas las más dañinas por los efectos mecánicos que ejercen sus raíces, pudiendo penetrar profundamente en la arquitectura y poniendo en peligro el edificio. En segundo lugar, los daños causados también pueden ser de naturaleza química, debido al intercambio iónico producido en las raíces en contacto con el sustrato, unida a la acción quelante y ácida de las excreciones. Sin embargo en ocasiones, las plantas mayores pueden resultar beneficiosas ya que suponen una barrera contra el viento, sol, lluvia y contaminación.

### *Animales*

Los daños derivados por animales en sitios arqueológicos de esta área maya son relativamente escasos. Generalmente las patologías derivadas de las acciones de animales se registran tras la excavación y exposición de la arquitectura. El deterioro principal se deriva de sus excrementos, ya que contienen ácidos solubles en agua que reaccionan con el sustrato, produciendo un efecto corrosivo sobre el material. Un ejemplo serían los excrementos producidos por aves pasajeras o por murciélagos. En este segundo caso resultan más perjudiciales ya que estos pequeños mamíferos suelen pasar largos periodos escondidos en zonas oscuras y resguardadas de la arquitectura.

Por otra parte, es habitual encontrar anidamientos de insectos en los intersticios u oquedades de las superficies de estuco, sobre todo restos nidos con acumulación de material orgánica y semillas que suponen depósitos de material orgánico que unido a la humedad, puede generar la colonización de microorganismos y el crecimiento de plantas mayores.

#### 4.2.5.4 Causas antrópicas

### *Saqueos*

Derivados de la acción antrópica, los saqueos o *hueches*<sup>17</sup>, se presentan generalmente en forma de túneles realizados violentamente sobre las ruinas sepultadas. Mediante este método, los saqueadores pretenden llegar hasta el corazón de las ruinas para hallar subestructuras, de periodos más tempranos y elementos como piezas cerámicas, lítica o incluso fragmentos de pintura mural, que puedan ser vendidos ilegalmente. Estas acciones se hallan masivamente en las ruinas y sus efectos son devastadores. Además de los daños materiales y culturales que producen, suponen un grave peligro para la arquitectura, poniéndola en ocasiones en peligro de derrumbe.

### *Daño hacia los materiales*

En menor grado de deterioro, a menudo se hallan diferentes acciones violentas contra los revestimientos que se encuentran expuestos. Estas acciones son fundamentalmente firmas o dibujos incisos sobre los estucos a modo de firma, realizados por personas que visitan el lugar. En el caso de La Blanca, estas incisiones se encuentran sobre todo en las zonas altas de los muros, generalmente acompañados de pátinas microbiológicas, por lo que probablemente han sido realizadas por visitantes y conocedores de las ruinas en su etapa de sepultura, cuando sólo sobresalían algunas zonas de la arquitectura. Se han registrado también algunos casos de incisiones y dibujos sobre los revestimientos intervenidos, una vez excavadas las estancias (6J1-3 y 6J2-4).

<sup>17</sup> El nombre *hueche* deriva de la palabra maya *weech* que significa armadillo; un animal que abre agujeros en el suelo, según el saber popular. El nombre destaca el acto de excavar aunque también abarca todo el proceso desde el saqueo hasta la venta, bajo el nombre de huechería (Paredes 2005:13)

### ***Abandono***

Finalmente y con las peores consecuencias, el abandono de un sitio por falta de recursos para mantenimiento, deja a la intemperie generalmente la arquitectura, estucos y pinturas que salieron a la luz en la excavación, condenándolos al intemperismo y a la pérdida definitiva. Por ello, y ante la inseguridad de poder garantizar su futuro mantenimiento, debe considerarse la opción del re-enterramiento una vez investigados los materiales, garantizando así su continuidad.

#### **4.2.6 Intervenciones realizadas sobre los estucos de La Blanca**

Los procedimientos que se han seguido en las intervenciones realizadas sobre los revestimientos de La Blanca han sido de carácter conservativo, siempre dentro del marco de la excavación arqueológica y de la necesidad urgente de estabilización y adaptación gradual de estos materiales a las nuevas condiciones ambientales. Por ello, en cada campaña de trabajo los objetivos marcados han sido fundamentalmente dos en función de las áreas de intervención:

- o Estabilizar los nuevos revestimientos surgidos tras la excavación de una nueva estructura, proporcionándoles la protección necesaria frente a las condiciones ambientales para que la adaptación a la exposición sea gradual y lo menos traumática posible, así como realizando las tareas de limpieza y refuerzo inmediato para garantizar su conservación.
- o Realizar labores de mantenimiento en todas las estancias excavadas con anterioridad, así como examinar el estado de conservación de los revestimientos mediante el seguimiento de patologías; detectando aquellas que pudieran haber surgido nuevas así como las causas que las han originado.

En todas las intervenciones anuales se ha seguido una metodología establecida, dando prioridad a los revestimientos recién liberados, dada su urgencia, y las acciones de mantenimiento en el resto de las estancias. En ambos casos los métodos empleados para el cumplimiento de los objetivos han sido: procurar una cubierta de protección, realizar el registro fotográfico inicial y determinar el estado de conservación de los revestimientos; realizar las acciones oportunas de limpieza y consolidación y garantizar un mantenimiento en las posteriores campañas de trabajo.

##### **4.2.6.1 Cubiertas de protección**

De vital importancia es garantizar la protección de los muros que componen las estancias durante el proceso de excavación y por supuesto tras ella. Conforme las estancias han ido quedando libres y los revestimientos de estuco expuestos a la intemperie, se ha provisto en todo momento de protección a los paramentos, mediante cubiertas opacas para impedir la entrada de las radiaciones solares, y sobre todo, la rápida evaporación del agua que contienen los materiales tras la exhumación.

Estas cubiertas provisionales se emplean durante el periodo de excavación del área, utilizando para ello material plástico (nylon), que a pesar de no ser adecuado a largo plazo, mantiene las características del ambiente de sepultura, creando un microclima de humedad y oscuridad que favorece la adaptación gradual de los materiales en los momentos más críticos. Esta cubierta es totalmente provisional ya

que sus contraindicaciones son conocidas, y se sustituye por una nueva y adecuada al finalizar la excavación de un área determinada. Las cubiertas definitivas se realizan de madera y palma y abarcan grandes áreas de arquitectura, evitando así las uniones de las cubiertas individuales y mejorando la protección (Para ver la relación de cubiertas empleadas en la Acrópolis de La Blanca, ver tabla 4.3).

#### 4.2.6.2 Documentación y registro

Una vez exhumados los cuartos y generalmente con la cubierta provisional, los revestimientos son evaluados macroscópicamente para determinar su estado de conservación. Todas las patologías existentes, tanto en los estucos como en el soporte pétreo, se documentan para elaborar posteriormente los mapas de daños que permiten obtener a largo plazo el proceso evolutivo de estas patologías y la aparición de otras nuevas. La documentación de estos daños se registra fotográficamente y además se toman muestras de aquellos productos de deterioro formados sobre los revestimientos, para su posterior análisis químico, que permitirá conocer más datos sobre las patologías que se están desencadenando en el material calcítico, así como las causas que las están produciendo y ofrecer una intervención más conveniente.

#### 4.2.6.3 Intervenciones sobre los revestimientos

Una vez evaluado el estado de conservación, se propone una intervención de urgencia para la estabilización de los revestimientos recién exhumados. Ésta se efectúa en base a las patologías halladas, al estado material de los estucos, a los productos disponibles y accesibles, y al tiempo de trabajo con que se cuenta en cada campaña. Las intervenciones realizadas a lo largo de estos años, se han basado en Cartas y Recomendaciones Internacionales para la restauración del patrimonio (Carta de Venecia 1964, Carta del Restauo 1972, Carta de Lausana 1990, Carta de Burra 1999), siendo los principales criterios:

- o Mínima intervención sobre los materiales originales. Interceder para lograr asegurar y equilibrar las obras, evitando el empeoramiento de las patologías existentes, mediante una conservación curativa. Toda acción implica un riesgo, por tanto, se realiza lo estrictamente necesario, asumiendo que los materiales sufren una degradación natural con el paso del tiempo. Deben rechazarse los tratamientos intemperantes que puedan agredir o distorsionar la integridad de la obra.
- o Reversibilidad de los materiales añadidos en la intervención. Dado que una restauración nunca es definitiva, sino revisable y renovable, tanto la técnica de ejecución como los materiales empleados proceden del entorno, por lo que son afines y compatibles con los originales.
- o Principio de durabilidad. Para garantizar la estabilidad de la intervención, se han realizado estudios previos sobre los materiales y las técnicas de ejecución originales. Este principio fundamenta el tema de estudio de esta tesis y la necesidad de hallar los materiales indicados para una restauración eficaz y avalada.
- o Principio de sostenibilidad. Los materiales afines empleados y el bajo coste de la intervención, facilitan el mantenimiento a largo plazo. Además, la realización de campañas anuales y la vigilancia en el sitio, son garantía de su correcto mantenimiento y de la conservación a largo plazo.

### *Ensayos previos de materiales*

Antes de aplicar un producto ajeno a los revestimientos, es imprescindible su verificación previa mediante pequeñas probetas en las que se pueda evaluar la compatibilidad con los materiales originales y su eficacia en la intervención. Es sabido que algunos productos de restauración pueden funcionar correctamente bajo condiciones ambientales estables, pero que envueltos en un clima tan adverso y cambiante, como el tropical, no presentan un buen funcionamiento y pueden ser muy dañinos con los materiales que constituyen las obras.

Estas pruebas iniciales se han centrado en los materiales a añadir en el proceso de consolidación, tanto interna como en los refuerzos perimetrales, y su idoneidad de ser empleados. Se han fundado en técnicas y materiales tradicionales (que han dado origen a esta tesis, Bloque 1I fase experimental) (Carrascosa y Lorenzo 2012; Lorenzo y Carrascosa 2015), siendo la naturaleza de éstos de origen calcítico para proporcionar la máxima compatibilidad.

### *Limpiezas*

Teniendo en cuenta que toda limpieza no debe alterar los materiales que componen la obra, ni su estructura, ni el aspecto original de la misma, las limpiezas que se han realizado en los revestimientos de La Blanca han sido precisas y esenciales, eliminando sólo aquellos productos de deterioro dañinos para la obra, sin realizar en ningún caso limpiezas en profundidad que puedan alterar más el ya deteriorado estuco. En este sentido, se ha tenido en cuenta que se trata de un sitio arqueológico, enclavado en la selva, y como tal, estas obras deben conservar ese carácter, otorgado por el valor de la pátina original.

#### *Limpieza mecánica*

Las limpiezas han sido principalmente de carácter mecánico; las acciones esenciales se han dirigido a la eliminación de las concreciones terrosas que se muestran adheridas a los revestimientos (Punto 4.2.4) (Fig. 4.38). La eliminación de estos depósitos, procedentes de la tierra de sepultura, se ha realizado con la mayor brevedad posible, mientras todavía conservaban la humedad, ya que conforme comienza a secarse la tierra, se adhiere con mayor fuerza a la superficie de los revestimientos y resulta más costosa y peligrosa su separación. Las herramientas empleadas en este caso han sido principalmente escalpelos y bisturís desafilados, ya que la superficie del estuco se encuentra muy blanda en los primeros instantes de su exposición a la luz.

Otra acción a realizar de forma mecánica ha sido la poda de raíces crecidas durante el tiempo de sepultura, y que se muestran sobre la superficie del estuco y entre los estratos de revestimiento y el soporte pétreo (Fig. 4.39). Estos restos orgánicos se hallan generalmente muy húmedos y adheridos sobre las superficies, por lo que se trata de una acción minuciosa, que sumada a la gran cantidad de raíces que recubre las superficies, se convierte en una labor que requiere de bastante tiempo. Este proceso se lleva a cabo mediante el uso de tijeras pequeñas y nunca arrancándolas con la mano o pinzas, ya que la adherencia que presentan al debilitado soporte podría ocasionar su desprendimiento.

En cuanto a las limpiezas que se han llevado a cabo en los revestimientos ya intervenidos anteriormente, se han empleado otros métodos en función a las patologías presentes. Estos estucos que ya cuentan con más tiempo en exposición y a los que se les realizó una primera limpieza tras la exhumación, cuentan con patologías distintas desarrolladas como consecuencia de la liberación de las estancias (Punto 4.2.4). Por ello, se han realizado principalmente limpiezas homogéneas en la superficie de los estucos, para eliminar las eflorescencias de sulfato de calcio que han ido apareciendo en los revestimientos de todas las estancias a medida que ha transcurrido el tiempo. Esta tarea se ha realizado mediante el cepillado de la superficie con cepillo de cerdas suaves, y siempre tras una inspección del estado de cohesión de la superficie, para evitar desprendimientos. De este modo también se eliminan residuos orgánicos de insectos y depósitos de tierra suelta acumulados en las oquedades de la superficie por arrastre del viento o por desprendimiento desde las zonas altas de los muros.



Fig. 4.38 Limpieza mecánica mediante brocha para eliminar depósitos terrosos. Fig.4.39 Eliminación de raíces adheridas al estuco tras la excavación del cuarto. Fig. 4.40 Limpieza físico-química de las concreciones biológicas mediante cepillo y etanol. Fotografías: B. Carrascosa.

### *Limpieza físico-mecánica*

Las limpiezas físico-mecánicas han sido moderadas, destinándose exclusivamente a la erradicación de colonias biológicas aparecidas sobre los revestimientos. Estas colonizaciones de microorganismos se muestran en mayor o menor grado, dependiendo de si se trata de arquitectura expuesta durante el tiempo de sepultura, o bien si han aparecido sobre los revestimientos de forma puntual, por filtraciones de agua a través de la cubierta, una vez intervenidos. En el primer caso, se necesitó de un trabajo mucho más intenso dado el carácter de costra gruesa, formado a lo largo de muchos años por la participación de distintos organismos, entre ellos bacterias, algas, hongos y musgos.

Dadas las pocas opciones de accesibilidad a materiales especializados en la zona, se realizaron pruebas de limpieza con etanol de 96° y agua desmineralizada al 50% (2A), a fin de erradicar la actividad microbiológica presente, y evitar así la propagación del deterioro de

la superficie provocado por dichos organismos. Previamente se realizaron catas de limpieza sobre pequeñas zonas del paramento para comprobar la resistencia del material calcítico, y la efectividad antiséptica del disolvente. Aunque el etanol es eficaz sobre las bacterias y algas y poco efectivo en hongos y musgos, se creyó conveniente su empleo ya que las primeras sirven de alimento y asiento a los segundos, eliminando así a ambos de una vez.

La forma de aplicación del disolvente ha sido mediante la acción directa de hisopos impregnados en el disolvente y la posterior remoción con escalpelo (Fig. 4.40); o bien, en las zonas más afectadas, mediante la aplicación de empacos de algodón hidrófilo impregnado, aplicado sobre una lámina de papel japonés y cubierto con film de polietileno para evitar la evaporación del disolvente durante el tiempo de actuación. Asimismo, se acompañó dicha limpieza con la posterior acción mecánica para ayudar a retirar las gruesas concreciones.

### *Consolidación y refuerzos perimetrales*

Las tareas de consolidación de los revestimientos tienen lugar generalmente tras la limpieza de las concreciones terrosas en las estancias recién exhumadas. Sin embargo, en ocasiones ha sido necesaria una fijación provisional, ya que el estado de debilidad de algunas zonas de los estucos no permitía la limpieza en primera instancia. Estas acciones de fijación han sido de carácter urgente, y se han realizado inmediatamente después de la exhumación de los cuartos.

#### *Fijación con papel japonés*

Se ha empleado este procedimiento para fijar de forma provisional aquellas zonas de estuco que tras la excavación se muestran muy debilitadas, con el riesgo de desprenderse conforme el material va perdiendo la humedad. Estas zonas corresponden normalmente a partes fracturadas del estuco, que se mantienen unidas al soporte pétreo mediante las raíces que han crecido entre ambos, durante el tiempo de sepultura. También se han fijado zonas con grandes fisuras o abolsamientos.

El objetivo de esta protección es afianzar el material al soporte para que pueda resistir la consolidación posterior. El papel japonés se adhirió mediante Sikalatex® (Emulsión acuosa de estireno-butadieno), un elastómero adquirido en la región de Flores<sup>18</sup>; empleándose a una concentración de 3% en agua destilada. Aplicado este papel de protección en las zonas críticas del estuco, se realizaron las labores de limpieza y poda de raíces, y posteriormente la consolidación interna.

<sup>18</sup> El producto fue seleccionado de entre los disponibles en el mercado; y se realizaron previamente pruebas de adherencia y reversibilidad.

### *Consolidación interna*

Una vez secado el adhesivo aplicado sobre el papel japonés, y estando asegurada la zona afectada del estuco, se procedieron a consolidar aquellas fracturas, fisuras y abolsamientos que hacían peligrar el material (Fig. 4.41). Para ello, se decidió emplear un mortero de cal líquido inyectado a través de la fractura o abolsamiento. Dado que las pruebas iniciales de morteros se realizaron con cal aérea, y este mortero no es adecuado para aplicarlo en zonas internas de los revestimientos<sup>19</sup>, se decidió realizar las consolidaciones internas empleando PLM-A<sup>®</sup> <sup>20</sup>, también compatible con los estucos originales. Tras 24h de la inyección del producto, se retiraron los papeles de protección empleados, empleando un hisopo impregnado en acetona.

Las consolidaciones internas que se han realizado desde que comenzaron las labores de restauración en el sitio en 2005, se han mantenido inalterables, mostrándose el estuco consolidado, firme y sin signos visibles de eflorescencias u otros productos de corrosión derivados del empleo de este mortero. Su naturaleza y aplicación ha sido totalmente afín y compatible con los materiales compositivos del estuco, así como con las condiciones ambientales de la zona.



Fig. 4.41 Consolidación interna de un abolsamiento mediante PLM-A<sup>®</sup>. Fig. 4.42 Reborde perimetral de estuco sobre paramento vertical. Fig. 4.43 Reborde perimetral de refuerzo de los estratos de estuco horizontales de la banqueta central de 6J2-2. Fotografías: B. Carrascosa.

<sup>19</sup> Los morteros de cal aérea no son indicados para zonas donde la penetración del aire se hace difícil, ya que reaccionan con el CO<sub>2</sub> atmosférico para realizar la carbonatación y podrían quedar líquidos o sin endurecer lo suficiente, poniendo en peligro la estabilidad del estuco consolidado. En estos casos es preferible el empleo de morteros con cales hidráulicas que reaccionan con agua sin necesidad de aire.

<sup>20</sup> Es un mortero comercial en polvo, compuesto a base de cales neutras exentas de sales, mezcladas con áridos seleccionados y aditivos modificadores de las propiedades reológicas. No altera la permeabilidad del material original, tiene propiedades físico-mecánicas parecidas y no es imprescindible la humectación previa del soporte.



### *Refuerzos perimetrales*

El refuerzo mediante rebordes perimetrales o “resanes”, término extendido en el área maya, es el sistema más empleado para la estabilización de los estucos presentes en la arquitectura de esta zona. Se trata de una intervención mínima pero primordial para la estabilidad de los estucos fracturados, que camina entre la acción restaurativa y la conservativa. Se interviene sobre el material fracturado aplicando un pequeño reborde de mortero a bisel, en el perímetro de las zonas de estuco fracturadas tras la limpieza de las superficies. De este modo, estas zonas quedan afianzadas al soporte, y además se sella la zona de fractura, impidiendo la entrada de depósitos terrosos, sales u otros compuestos transportados por el viento, que puedan penetrar entre el soporte y el estuco, favoreciendo el inicio de nuevas patologías (Fig. 4.42-4.43).

Los morteros de cal que se han empleado para la realización de estos rebordes perimetrales, se han basado en probetas iniciales realizadas, en las que se pudo comprobar la efectividad y la reversibilidad de éste una vez endurecido. Los materiales que se han empleado para realizar estos rebordes han sido cal aérea apagada por pudrición y cal aérea apagada por inmersión en agua, dado que ambas funcionaban correctamente; como árido se empleó arena blanca del propio yacimiento, y agua corriente en caso de ser necesaria para la trabajabilidad del mortero.

Este proceso se ha empleado extensamente dadas las áreas de estuco fracturado que presentan los cuartos excavados. Además de reforzar los revestimientos de los muros verticales, también se han aplicado estos rebordes a los estucos de la superficie de las banquetas centrales y laterales que presentan todas las estancias.

Los rebordes de mortero que se aplicaron inicialmente sobre los estucos recién exhumados, han ido variando a lo largo del tiempo; en la mayoría de las zonas intervenidas, sobre todo en las partes altas, se han mantenido perfectamente anclados al soporte y al estuco sin mostrar síntomas de deterioro. En algunos casos, especialmente en las franjas bajas de los revestimientos, más afectados por la cristalización de sales, se han separado del soporte pétreo a consecuencia del deterioro del estuco original. En estos casos, durante las acciones de mantenimiento anuales, han sido retirados y se han vuelto a aplicar, siempre que la estabilidad del estuco lo ha permitido. El hecho de que estos rebordes se separen del soporte es síntoma del deterioro que sufren los revestimientos y la piedra caliza continuamente, sin embargo también reafirma la reversibilidad e inocuidad para con los estucos originales.

#### 4.2.6.4 Medidas preventivas

Al finalizar las intervenciones de cada campaña de trabajo en La Blanca, ha sido fundamental para la correcta conservación de los revestimientos, tomar una serie de medidas preventivas en el sitio, que eviten en la medida de lo posible aumentar los daños que ya de por sí sufren estas obras. Las labores llevadas a cabo han sido:

- o Colocar una capa de tierra cribada sobre la superficie de las banquetas centrales intervenidas. De este modo se amortigua la presión derivada de las personas que visitan el sitio, y que entran a observar el interior de las estancias; protegiendo el estuco original así como los rebordes perimetrales efectuados.
- o Controlar el crecimiento de plantas mayores en el suelo del interior de las estancias mediante la revisión de los suelos, detectando zonas de acumulación de material orgánico arrastrado por el viento, que puede favorecer al crecimiento de éstas.
- o Revisar el estado de las cubiertas de protección, detectando posibles filtraciones de agua o el inicio de la descomposición de partes de la cubierta, alertando al equipo y promoviendo la reparación de estas zonas.
- o Concienciar al equipo de vigilancia de La Blanca de la necesidad de supervisión del sitio, en especial de todos aquellos factores de deterioro que intervienen en detrimento de los revestimientos y la arquitectura; promoviendo la realización de pequeñas labores de mantenimiento como el barrido de los suelos de las estancias para eliminar dichas acumulaciones orgánicas, la revisión de las cubiertas y la supervisión de las visitas.

Mediante estas sencillas tareas, el sitio arqueológico ha permanecido en buen estado desde que comenzó el trabajo de investigación el Proyecto, consiguiéndose que en cada nueva campaña que los daños ocasionados en los revestimientos de estuco sólo estén relacionados con las condiciones climáticas y el proceso natural e inevitable de deterioro, y se hayan evitado daños derivados de las acciones antrópicas.



... Que el nuestro sea un tiempo que se recuerde por el despertar de una nueva reverencia ante la vida; por la firme resolución de alcanzar la sostenibilidad; por el aceleramiento en la lucha por la justicia y la paz y por la alegre celebración de la vida...

Carta de la Tierra 2000

BLOQUE 2



FASE EXPERIMENTAL



# CAPÍTULO 5

## ESTUDIO EXPERIMENTAL DE MORTEROS TRADICIONALES DE CAL

## 5.1 Materiales y metodología

Como ya se ha comentado anteriormente, el fundamento de esta investigación es poner en práctica las diversas variedades técnicas que se han recopilado en el estudio bibliográfico y que pudieron haber sido empleadas por los antiguos mayas en la elaboración de sus estucos, dependiendo de algunos factores como la geografía y la disponibilidad de los materiales en el momento; la experiencia aprendida de un determinado grupo, o la urgencia de la obra constructiva. Con ello, poder realizar un estudio de las propiedades físico-mecánicas, así como de la durabilidad de cada tipo de mortero frente a agentes de deterioro y poder extraer conclusiones de idoneidad con los estucos originales arqueológicos, así como de la viabilidad de ser empleados en las labores de conservación y restauración de una forma eficaz y sostenible.

El estudio práctico de estos materiales comenzó en la campaña de trabajo de 2008, con la realización de un muro expositivo en el Centro de Visitantes del sitio, cuyo propósito era la reproducción de las fases constructivas de un muro maya; comenzando por los sillares de piedra caliza, el revestimiento de estuco, la película pictórica y la incisión de varios de los grafitos más representativos que han aparecido en los revestimientos de La Blanca. Para la realización de estos revestimientos se estudiaron varias cales y áridos locales en distintas dosificaciones, así como una selección de las especies arbóreas susceptibles de ser empleadas (Carrascosa, Lastras y Lorenzo 2009).

### 5.1.1 Materias primas: Selección, preparación y dosificación

Las materias primas esenciales que han sido seleccionadas y empleadas en la elaboración de las probetas a estudio han sido: cal en tres variantes técnicas de apagado, dos tipos de áridos locales, cortezas de tres especies arbóreas originarias del área maya y agua.

#### 5.1.1.1 Cal

La cal empleada en la realización de las probetas se ha obtenido de una calera cercana al sitio arqueológico, concretamente de la localidad de San Benito, Petén (Fig. 5.1, 5.2). De este lugar se obtuvo la cal para realizar las probetas de las campañas 2011, 2013 y 2015. Tras cerrar esta calera y visitar varias localidades cercanas con la misma tipología de horno, no se pudo conseguir cal en un lugar más cercano, con lo que las probetas de la campaña 2016, fueron realizadas con cal obtenida de Ciudad de Guatemala, de una calera pequeña donde se calcina la cal en un pequeño horno, similar al de San Benito.

La adquisición de la cal se realizó al día siguiente de la extracción de ésta del horno, tras la quema, por lo que se partió siempre de cal viva (óxido de calcio), para la posterior y respectiva preparación. Los sistemas de apagado que se decidieron se basaron en las fuentes bibliográficas descritas en la fase previa de estudio (descritos en el punto 3.4 del Bloque 1 de esta tesis).





Fig. 5.1 Horno de cal de San Benito, Petén. Extracción de la piedra calcinada tras la cocción. Fig. 5.2 Calera de San Benito, Petén. Exposición de la cal viva para su apagado por pudrición.

### *Preparación de la cal*

#### *Apagado por inmersión mediante agua corriente*

Para realizar el apagado por inmersión en agua corriente se obtuvo un recipiente metálico, con tal de evitar que el calor producido por la reacción exotérmica pudiera dañar cualquier otro material. Se calcularon tres volúmenes de agua corriente a temperatura ambiente ( $22^{\circ}\text{C}$  -  $25^{\circ}\text{C}$ ), que se dejó reposar durante 24 horas. Una vez introducida el agua en el recipiente, se calculó un volumen de cal viva (en piedra) que se dejó caer al interior del agua, sumergiéndose casi por completo. Inmediatamente comenzó a reaccionar el óxido de calcio, expulsando calor y vapor hacia el exterior, al tiempo que se expandía su volumen.

Debido al ajustado tiempo disponible durante la campaña de trabajo, la cal se dejó hidratar durante 10 días, removiendo la pasta una vez al día. Se cubrió el recipiente para mitigar la evaporación de agua debido a las altas temperaturas. Pasados los 10 días, la cal (hidróxido de calcio) en forma de pasta, se pasó por un tamiz de 2mm de luz con el fin de eliminar algunas impurezas, como partículas de cal no cocidas o impurezas procedentes de la calcinación en el horno. Esta cal se depositó en un recipiente plástico cerrado para evitar el contacto con el  $\text{CO}_2$ , y se reservó hasta su empleo.

#### *Apagado por inmersión mediante agua macerada*

Para el apagado de la cal mediante el agua de la maceración de las cortezas vegetales, se procedió del mismo modo que con el agua corriente; se prepararon seis recipientes metálicos correspondientes a cada tipo de corteza vegetal en sus dos proporciones seleccionadas ( $\pm 0,5$  y 2%)(Fig. 5.3). Se añadieron tres volúmenes del agua de maceración correspondiente y se introdujo un volumen de cal viva en cada recipiente (Fig.5.4). El tiempo de hidratación fue de 10 días en las mismas condiciones y tras ello, se tamizaron las diferentes pastas de cal para eliminar impurezas.



Fig. 5.3 y Fig. 5.4 Apagado de la cal viva en el agua de maceración, donde se observa la reacción exotérmica producida.

### *Apagado por exposición ambiental (pudrición)*

Para este tipo de apagado, la cal viva en piedra, se expuso en una superficie lisa, creando una capa de unos cinco cm. de espesor, que se machacó en la medida de lo posible para facilitar la hidratación (Fig. 5.5, 5.6). Seguidamente se techó provisionalmente para evitar las radiaciones lumínicas excesivas, pero permitiendo la libre circulación de aire. El tiempo de hidratación fueron también 10 días, y en este periodo la cal se fue removiendo para facilitar la hidratación de las partículas más profundas. Una vez pasado el tiempo se observa el hidróxido de calcio convertido en un polvo blanco, ligeramente húmedo, con textura de “migas”. Se guardó en un recipiente plástico cerrado hasta su uso.



Fig.5.5 y Fig. 5.6 Apagado de la cal viva por exposición atmosférica (pudrición).

### *Apagado mediante mezclado en caliente (Hot Mix)*

Para este sistema se prepararon doce mezclas con el fin de apagar la cal con los dos áridos seleccionados y con las dos proporciones de cada tipo de aditivo gomoso seleccionado. Los áridos ya preparados se midieron en una proporción de 3 volúmenes y se depositaron en un recipiente en forma de montículo. A este montículo se le hizo un orificio en la parte superior y en él se introdujo un volumen de cal viva en piedra (ligeramente machacada). Se añadió a cada preparación un volumen de agua de cada tipo de corteza, en las dos proporciones seleccionadas (Fig. 5.7). El proceso se realizó como se describió anteriormente (punto 3.4 del Bloque 1). Cuando la cal viva comenzó a reaccionar y a emitir calor y vapor, se tapó con la arena circundante para dejarla cocer y que alcanzara la máxima temperatura, que fueron 120°C. Después se añadió poco a poco otro volumen de agua y se removió de nuevo la mezcla. Las mezclas compuestas por arena blanca del sitio arqueológico, necesitaron un poco más de agua (1/2 volumen) para conformar el mortero final. De las mezclas realizadas con *Sascab*, se obtuvo un mortero firme con 2 volúmenes de agua.



Fig. 5.7 Secuencia de apagado de la cal por mezclado en caliente (Hot Mix). Superior. Izda. Mezclado en seco del árido con la cal viva. Superior. Dcha. Adición de agua de macerado y reposo hasta alcanzar la máxima temperatura. Inferior. Izda. Adición de agua de macerado y mezclado. Inferior. Dcha. Mortero listo.



### 5.1.1.2 Áridos

Los áridos propuestos para esta experimentación práctica, se han seleccionado atendiendo a dos motivos principales:

- o Por su aparición reiterada en la bibliografía consultada, tanto etnográfica como etnohistórica. El *Sascab*, es el componente de carga empleado por los antiguos mayas como sustituto de la arena, con una composición calcárea y fina textura parecida a una “harina”.
- o En segundo lugar, se decidió introducir en el estudio un árido diferente al *Sascab* por una cuestión principalmente de disponibilidad y facilidad, ya que a menudo es difícil hallar *Sascaber* en las proximidades de un sitio arqueológico; por lo que consideramos que se deben estudiar otros materiales, inmediatamente disponibles, para conocer su comportamiento y la idoneidad de ser empleados en labores de conservación, en caso de ser necesario.

Por ello los áridos seleccionados fueron el *Sascab* y la arena blanca presente en el sitio arqueológico La Blanca (Fig. 5.8 y 5.9). El *Sascab* se obtuvo de un afloramiento relativamente cercano, ubicado en la localidad de Paxcaman, Petén, a unos 50 km del sitio arqueológico.



Fig. 5.8 Arena blanca. Tamizado del árido para la preparación del mortero. Fig. 5.9 *Sascab*. Tamizado del árido para la preparación del mortero.

Para su preparación, ambos áridos fueron introducidos en depósitos de agua para eliminar en la medida de lo posible, partículas orgánicas presentes, que flotan hacia la superficie. Tras eliminar dichas partículas, el agua fue escurrida y el árido se dejó secar al sol. Una vez secos, se cribaron mediante un tamiz de 2mm de luz para homogeneizar la granulometría y eliminar pequeñas piedras. El *Sascab* presenta generalmente una granulometría menor que la malla del tamiz, por lo que en el cribado apenas se eliminaron partículas mayores. Por el contrario la arena del sitio arqueológico presentaba una granulometría heterogénea, con bastante cantidad de piedrecillas.

Los áridos fueron empleados a razón de 3:1 (volúmenes, árido-cal) en todas las probetas realizadas ya que esta proporción es la más citada en la bibliografía consultada, y en la práctica da buenos resultados de cohesión, dureza y escaso agrietamiento, según estudios previos propios realizados (Carrascosa, Lastras y Lorenzo 2009).

### 5.1.1.3 Aditivos vegetales

Son diversas las especies arbóreas que hasta la fecha han sido estudiadas mediante ensayos experimentales *in situ*, obteniéndose buenos resultados. En este estudio la elección de las especies vegetales ha estado determinada por:

- o Su aparición en fuentes en la bibliografía como especies empleadas por los mayas para la mejora de sus estucos.
- o A su vez debían ser especies abundantes en las inmediaciones del sitio arqueológico, para facilitar su recolección y elaboración de los estucos; así como para garantizar la sostenibilidad de éstos.

Por ello, las especies vegetales que se escogieron para este estudio fueron el Habín, el Ramón y el Pixoy (Fig. 5.10, 5.11 y 5.12). La forma de introducir sus gomas en las pastas de cal es a través de la maceración de sus cortezas en agua. Dado que cada árbol posee un tipo y cantidad distinta de goma, se planteó la necesidad de conocer la cantidad de exudado que se obtiene de cada corteza, con el fin de poder hacer comparaciones equitativas en cada tipo de mortero, en los diversos ensayos de este estudio. Por ello se realizó en primer lugar el procesado de estas cortezas mediante un sencillo ensayo de cocción/reducción. Dada la solubilidad de las gomas en agua, el ensayo consistió en la cocción de determinada cantidad de corteza en agua, controlando los parámetros constantes de temperatura y tiempo hasta la evaporación casi total del agua, cuantificando el residuo o goma obtenido de cada corteza (Tabla 5.1).



Fig.5.10 Habín (*Piscidia piscipula*). Fig.5.11 Ramón (*Brosimum alicastrum*). Fig. 5.12 Pixoy (*Guazuma ulmifolia*).



Fig. 5.13 Extracción de la corteza de Pixoy mediante machete. Fig. 5.14 Sangrado de la savia en la corteza de Ramón.

Tabla 5.1 Parámetros constantes empleados en el ensayo de extracción de residuo por reducción.

CORTEZA	gr.	Agua gr.	Tiempo min.	TC	Residuo gr.
Habín ( <i>Piscidia Piscipula</i> )	100	200	15	95	0,1
Ramon ( <i>Brosimun Alicastrum</i> )	100	200	15	95	6,2
Pixoy ( <i>Guazuma Ulmifolia</i> )	100	200	15	95	17,8

De este modo se pudo comprobar que la corteza que más goma posee es la del Pixoy, quedando un residuo muy abundante, de textura gelatinosa, muy adhesiva, con una coloración rojiza muy intensa y un fuerte y dulce aroma. Con estos datos se procedió al cálculo de la cantidad de corteza necesaria para obtener en proporción la misma cantidad de goma de cada especie arbórea y añadirla en dos porcentajes de concentración (Tabla 5.2). Los porcentajes seleccionados han sido al 0,5% y al 2% de concentración. Como la cuantificación de estos extractos no se ha realizado por un procedimiento científico-riguroso, y la concentración de las gomas en las cortezas puede variar según diversos factores (zona del árbol, edad, temporada, etc.), no se pueden considerar porcentajes exactos, por lo que debemos hablar de concentraciones aproximadas ( $\pm 0,5\%$  y  $\pm 2\%$ ).

Tabla 5.2 Cantidad de corteza empleada para la elaboración de los porcentajes de agua de maceración.

CORTEZA	% GOMA	CORTEZA gr.	AGUA gr.
Habín ( <i>Piscidia Piscipula</i> )	0,5	500	5000
	2	2500	5000
Ramon ( <i>Brosimun Alicastrum</i> )	0,5	403,2	5000
	2	1612,9	5000
Pixoy ( <i>Guazuma Ulmifolia</i> )	0,5	140,45	5000
	2	561,79	5000

Una vez calculada la relación de corteza necesaria de cada árbol, se extrajeron de cada especie la cantidad necesaria para la maceración<sup>1</sup>. Las cortezas se extrajeron por corte directo, y se les retiró, en la medida de lo posible, la parte gruesa exterior (Fig.5.13 y 5.14). Se introdujeron en depósitos plásticos tapados con agua corriente a temperatura ambiente y se dejaron macerar durante 72h. Transcurrido el tiempo, se extrajeron las cortezas y se filtró el agua para eliminar restos de corteza y fibras vegetales.

## 5.1.2 Elaboración de las probetas

### 5.1.2.1 Tipología de morteros y composición

Los morteros realizados se han basado en las variantes técnicas de manufactura maya, descritas en la bibliografía consultada, así como algunas variaciones que se han considerado interesantes para esta investigación. Se han creado tres grupos de mortero cuya principal diferencia atiende al modo de apagar la cal viva (Tabla 5.3).



Fig. 5.15 Morfología de las probetas empleadas para los distintos ensayos de laboratorio.

<sup>1</sup> La elaboración de las probetas de este estudio se ha llevado a cabo en las campañas anuales de trabajo entre 2011 y 2016, por lo que cada año se extrajo la cantidad justa y necesaria para la elaboración de un grupo de probetas, hallándose totalmente sanadas y renovadas las especies arbóreas sangradas el año anterior. Por ello se consideró importante la abundancia de una misma especie en el área, para su descanso.



Tabla 5.3 Relación de probetas de mortero realizadas atendiendo a cada grupo técnico determinado.

GRUPO	APAGADO			ELABORACIÓN MORTERO			SIGLA
	Medio	Corteza	±%	Árido	Agua de amasado	±%	
1 Cal viva apagada por inmersión (fusión)	1.1 Agua			Sascab	Pixoy	0,5 2	IASP5 IASP2
					Habín	0,5 2	IASH5 IASH2
					Ramón	0,5 2	IASR5 IASR2
					Agua	-	ISP
				Arena del sitio	Pixoy	0,5 2	IAAP5 IAAP2
					Habín	0,5 2	IAAH5 IAAH2
					Ramón	0,5 2	IAAR5 IAAR2
					Agua	-	IAP
	1.2 Macerado			Sascab	Pixoy	0,5 2	IMSP5 IMSP2
					Habín	0,5 2	IMSH5 IMSH2
					Ramón	0,5 2	IMSR5 IMSR2
					Pixoy	0,5 2	IMAP5 IMAP2
				Arena del sitio	Habín	0,5 2	IMAH5 IMAH2
					Ramón	0,5 2	IMAR5 IMAR2
2 Cal viva apagada por exposición (pudrición)	Humedad ambiental			Sascab	Pixoy	0,5 2	PSP5 PSP2
					Habín	0,5 2	PSH5 PSH2
					Ramón	0,5 2	PSR5 PSR2
					Agua	-	PSP
				Arena del sitio	Pixoy	0,5 2	PAP5 PAP2
					Habín	0,5 2	PAH5 PAH2
					Ramón	0,5 2	PAR5 PAR2
					Agua	-	PAP
3 Cal Viva apagada por mezclado en caliente con el árido ( <i>Hot Mix</i> )	Macerado			Sascab	Pixoy	0,5 2	HSP5 HSP2
					Habín	0,5 2	HSH5 HSH2
					Ramón	0,5 2	HSR5 HSR2
					Agua	-	HSP
					Pixoy	0,5 2	HAP5 HAP2
					Habín	0,5 2	HAH5 HAH2
				Arena del sitio	Ramón	0,5 2	HAR5 HAR2
					Agua	-	HAP



- o Grupo 1: Realizado con cal viva apagada por inmersión (fusión) (Magaloni 2001; Vázquez de Ágredos; Guash 2016); que a su vez se ha subdividido en dos, al apagado de la cal viva con agua y con agua macerada.
- o Grupo 2: Realizado con cal viva apagada por exposición (pudrición) (Morris *et.al* 1931; Schreiner 2002; Muñoz 2006; Hansen y Castellanos 2005; Russell y Dahlin 2007).
- o Grupo 3: Realizado con cal viva apagada por mezclado en caliente con el árido (*Hot Mix*). Dada la similitud de este procedimiento con los descritos por varios informantes, durante la realización de estudios experimentales (Morris *et.al* 1931; Magaloni 2001; Schreiner 2002), se decidió incluir este grupo de morteros en el presente estudio (Tabla 5.4).

A su vez cada grupo de mortero se experimenta con los dos áridos mencionados y con los tres tipos de exudados vegetales, en dos porcentajes diferentes; siendo cuatro las variantes técnicas que pueden condicionar el comportamiento de estos morteros:



La dosificación de los morteros establecida se ha mantenido constante en los tres grupos técnicos siendo de 1 volumen de cal, 3 volúmenes de árido y  $\pm 1$  volumen de agua de amasado. El grupo 1 ha necesitado un poco menos de ese volumen de agua al emplear la cal en pasta y contener ya cierta cantidad de agua del apagado.

### 5.1.2.2 Lugar de elaboración

Las probetas fueron realizadas en el laboratorio- taller del proyecto La Blanca, en Flores, Petén, durante las diversas campañas de trabajo comprendidas entre 2011 y 2016 (Tabla 5.4).

Tabla 5.4 Relación de grupos de probetas realizados en cada campaña de trabajo.

GRUPO	SUBGRUPO EN FUNCIÓN DEL ÁRIDO EMPLEADO	SIGLAS	AÑO
Grupo 1 IA-IM	Cal viva apagada por inmersión con agua y arena blanca como árido.	IAA	2011
	Cal viva apagada por inmersión con maceración y arena blanca como árido.	IMA	
	Cal viva apagada por inmersión con agua y <i>Sascab</i> como árido.	IAS	2013
	Cal viva apagada por inmersión con maceración y <i>Sascab</i> como árido.	IMS	
Grupo 2 P	Cal viva apagada por exposición (pudrición) y <i>Sascab</i> .	PS	2015
	Cal viva apagada por exposición (pudrición) y arena blanca.	PA	2016
Grupo 3 H	Cal viva apagada por mezclado en caliente con <i>Sascab</i> .	HS	2016
	Cal viva apagada por mezclado en caliente con arena blanca.	HA	

### 5.1.2.3 Condiciones ambientales presentes

Las probetas se han realizado en diferentes estaciones, atendiendo al periodo en que se ha llevado a cabo la campaña de trabajo en el sitio arqueológico, siendo posible que las variaciones en los parámetros de humedad y temperatura hayan influido en el curado de las probetas. Las condiciones ambientales fueron registradas mediante un termo-higrómetro *data logger* SCORT RH ILog®, realizando mediciones cada cuatro horas, durante los días de estancia. Cabe señalar que las condiciones ambientales de la campaña 2016 han sido las más extremas por su elevada temperatura. Las medias registradas para cada campaña de trabajo han oscilado entre 20-24°C y 80-95% HR para los meses de Noviembre y Diciembre, correspondientes a las campañas de 2011 y 2013 (Fig. 5.16); y entre 30-32°C y 65-70% HR para los meses de Marzo y Abril en las campañas de 2015 y 2016.

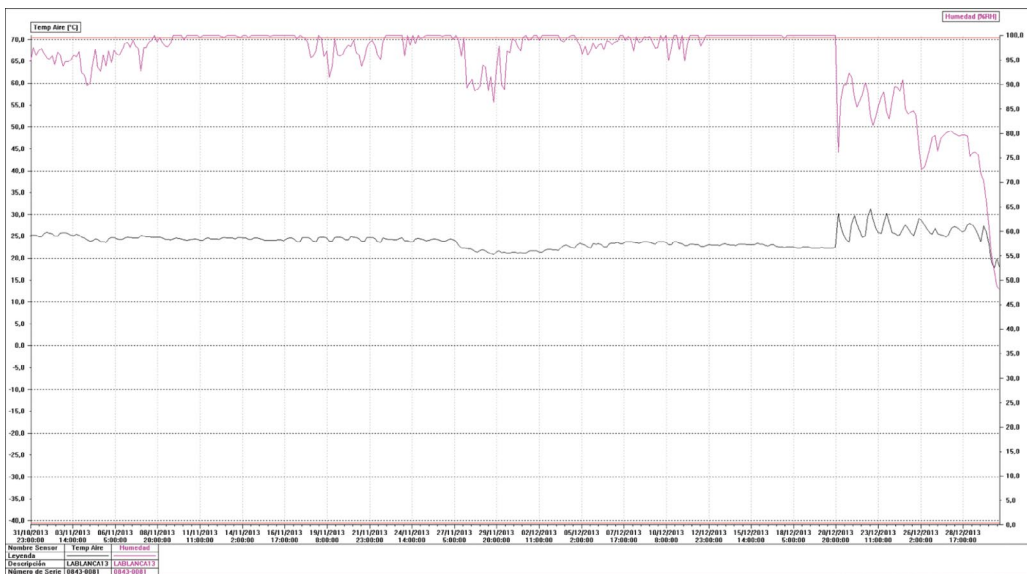


Fig. 5.16 Registro de las condiciones ambientales durante la campaña de trabajo de 2013.

### 5.1.2.4 Moldeado y curado

Una vez realizados los correspondientes morteros, se moldearon en forma de pequeños paralelepípedos de 4 x 4 x 2 cm, empleando una estructura plástica desmontable, sin base. Los moldes se aseguraron sobre una tabla de madera, que se humectó antes de rellenar con el mortero. Después se agitó suavemente la tabla durante unos minutos con el fin de eliminar burbujas de aire atrapadas en el interior del mortero. Una parte de cada tipo de mortero fresco se guardó en bolsas plásticas herméticas para el ensayo mecánico de adhesión al soporte (punto 5.3 Bloque 1I).

Los moldes se colocaron en el taller, resguardados del sol, y en la medida de lo posible del calor directo. A las 72h de su moldeado y ya endurecidos al tacto, se retiraron los moldes desmontables

para facilitar la entrada de aire y el proceso de carbonatación. Se mantuvieron en curado durante una semana antes de ser empaquetados. Se realizaron 35 probetas de los 54 tipos de morteros, con un total de 1890 probetas; contando con la posibilidad de roturas en el traslado a España.

#### 5.1.2.5 Siglado

El siglado de las probetas se realizó una vez endurecidas, antes de su desmoldado, mediante un rotulador permanente en la cara superior de cada probeta, con las correspondientes siglas mostradas en la tabla 5.4.

#### 5.1.2.6 Transporte y almacenaje

Tras una semana de curado, las probetas se envolvieron por parejas en film transparente y se introdujeron en contenedores plásticos, con material amortiguante para evitar roturas durante el viaje. En cada campaña de trabajo se trasladaron las probetas realizadas al Taller de Materiales Arqueológicos del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio para su ensayo, y se mantuvieron expuestas en unas condiciones de humedad y temperatura de entre 20-24°C y 50-55% HR.

#### 5.1.2.7 Adecuación de las probetas a los respectivos ensayos

Las probetas se acondicionaron a cada tipo de ensayo de laboratorio para cumplir con las normativas UNE-EN. Los tamaños y formas adoptadas para cada ensayo se resumen en esta tabla:

Tabla 5.5 Relación de ensayos realizados y características de las probetas empleadas.

ENSAYOS DE LABORATORIO	TAMAÑO	Nº PROBETAS POR ENSAYO
Determinación de la absorción de agua por capilaridad	2x2x2	4
Determinación de la absorción/ desorción de agua a presión atmosférica	4x4x2	2
Determinación de la permeabilidad al vapor de agua	4∅	3
Determinación de la resistencia a la carbonatación	4x4x2	1
Resistencia a compresión	4x4x2	1
Resistencia de la adhesión al soporte	1∅	2
Resistencia al desgaste por rozamiento	4x4x2	1
Determinación de la resistencia a la cristalización de sales	2x2x2	4
Determinación de la resistencia al choque térmico	4x4x2	1
Ensayo de envejecimiento por irradiación ultravioleta	4x4x2	2
Ensayo de envejecimiento por exposición a humedad y temperatura		
Determinación de la permeabilidad al vapor de agua	4 ∅	2
Determinación de la absorción de agua por capilaridad	2x2x2	2
Determinación de la absorción/ desorción de agua a presión atmosférica	4x2x2	2

## 5.2 Ensayos de caracterización física

Estos ensayos se han realizado con el objetivo de reconocer las características morfológicas de los morteros y su influencia en el comportamiento hídrico que tiene cada variedad de mortero, ya que el agua es el principal factor de deterioro que afecta a los estucos originales de La Blanca dada su ubicación. Este comportamiento depende directamente del sistema poroso del mortero; revelando mayor absorción de agua a mayor tamaño de poro (Más i Barbera 2006:195).

### 5.2.1 Determinación de la absorción de agua por capilaridad

El objeto de este ensayo físico es determinar la absorción de agua por capilaridad, o succión, de los distintos grupos de mortero realizados, pudiéndose valorar con ello la influencia de factores como la adición de sustancias vegetales o la porosidad. Para el seguimiento de este ensayo se ha empleado la normativa española UNE-EN 15801: 2010 (CEN®). La cantidad de agua absorbida por la probeta por unidad de superficie  $Q_i$  (gr/cm<sup>2</sup>) en el tiempo  $t_i$  (s) se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$Q_i = \frac{m_i - m_o}{A}$$

Siendo  $Q_i$  la cantidad de agua absorbida por unidad de superficie en gr/cm<sup>2</sup>,  $m_i$  la masa de la probeta en el tiempo  $t_i$ , en gr.,  $m_o$  la masa de la probeta en seco en gr. Y  $A$ , la superficie de la probeta en contacto con el agua, en cm<sup>2</sup>. El coeficiente de absorción de agua por capilaridad (AC) es la pendiente de la parte lineal de la curva obtenida, representando la variación de masa por unidad de superficie ( $Q_i$ ) en función de la raíz cuadrada de tiempo ( $t_i^{1/2}$ ).

#### 5.2.1.1 Metodología de ensayo

Se han empleado cuatro probetas de 1x1x2 cm de cada tipo de mortero. Se prepararon secándose en estufa de aire caliente a 60°C hasta llegar a masa constante ( $m_o$ ) (diferencia de masa inferior a 0,1% en dos pesadas consecutivas) y se dejaron enfriar hasta los 22°C antes de comenzar el ensayo. Se prepara un lecho permeable empapado en agua que deberá mantener constante este nivel. Las probetas se colocan sobre este lecho y se mantienen en contacto durante intervalos de tiempo establecidos, dependiendo de la succión del material (Fig.5.17). Dada la rápida absorción de los morteros, para este ensayo se seleccionaron los periodos: 5", 15", 35", 75", 2', 5', 10', 20', 35', 55', 85' y 24h. Tras las primeras 24h, se ha seguido midiendo la masa ( $m_o$ ) hasta llegar a la saturación, generalmente a los 8 días de ensayo. A cada intervalo se levantan las probetas y se pesan. El ensayo finaliza cuando la diferencia entre dos pesadas consecutivas (24h) no es superior a 1% de la masa de agua absorbida; o cuando transcurran ocho días desde el comienzo.



Figura 5.17 Absorción de agua por capilaridad de las probetas durante los primeros instantes del ensayo.

### 5.2.1.2 Resultados del ensayo

Los gráficos de absorción capilar muestran en general unas curvas compuestas por dos trayectorias o direcciones, una ascendente y otra recta. Esta trayectoria está bien definida en el grupo de las probetas patrón (Gráfico 5.9), así como en los grupos PA, PS, IAA y HS (Gráficos 5.5, 5.6, 5.2 y 5.7); evidenciando una mayor velocidad de absorción de agua en las primeras pesadas del ensayo, llegando más rápidamente a la saturación. Los grupos IMS, IMA, HA e IAS presentan una curva ascendente bastante gradual, indicativo de una absorción de agua de manera más lenta (Gráficos 5.1, 5.3, 5.4 y 5.8 ). Las curvas que muestra cada grupo técnico de morteros no presentan apenas diferencias entre sí, siendo muy similares independientemente del tipo de exudado que contengan, así como del porcentaje al que se adicionó al agua. En los grupos IMA y HA, se observa una diferencia de trayectoria en las probetas IMAR5 (Ramón 0,5%) y HAP5 (Pixoy 0,5%) respectivamente, las cuales absorben mayor cantidad de agua y de forma más rápida que el resto de probetas de su grupo.

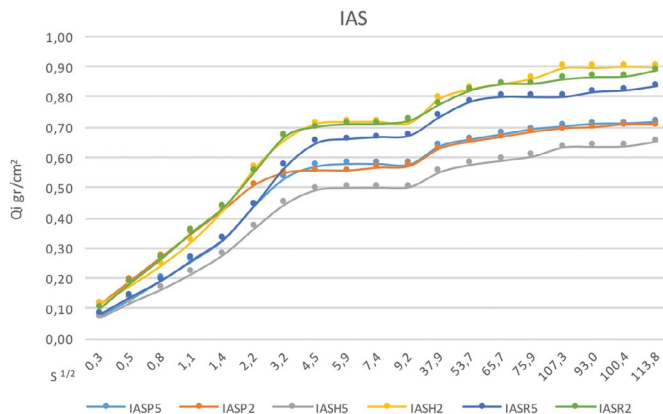


Gráfico 5.1 Curvas de absorción para el grupo realizado mediante cal apagada por inmersión con agua, *Sascab* y aditivos orgánicos.

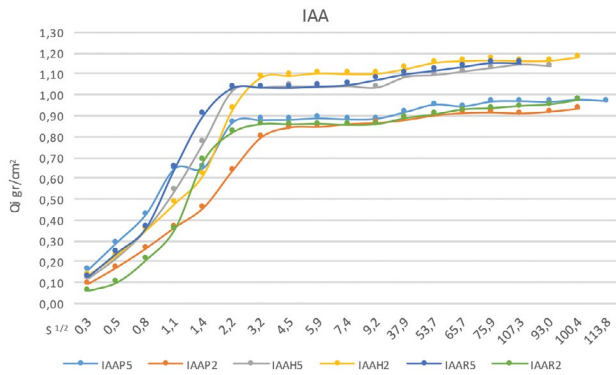


Gráfico 5.2 Curvas de absorción para el grupo realizado mediante cal apagada por inmersión con agua, arena blanca y aditivos orgánicos.

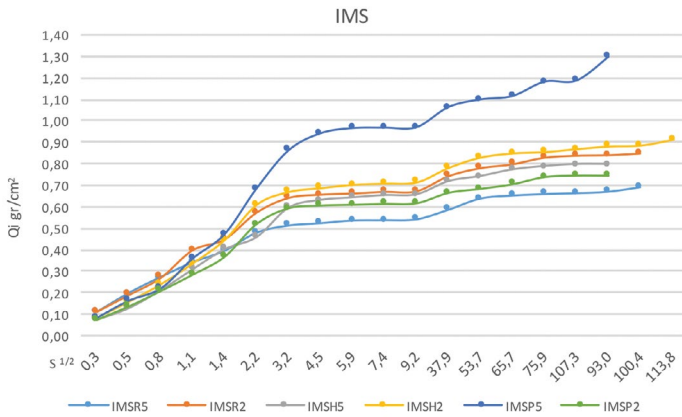


Gráfico 5.3 Curvas de absorción para el grupo realizado mediante cal apagada por inmersión con agua macerada, *Sascab* y aditivos orgánicos.

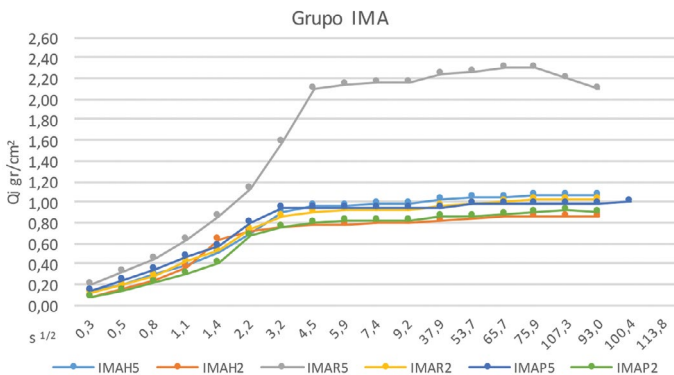


Gráfico 5.4 Curvas de absorción para el grupo realizado mediante cal apagada por inmersión con agua macerada, arena blanca y aditivos orgánicos.

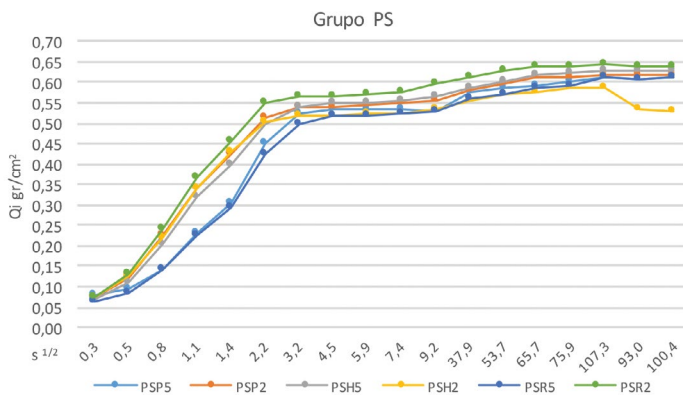


Grafico 5.5 Curvas de absorción para el grupo realizado mediante cal apagada por pudrición con *Sascab* y aditivos orgánicos.

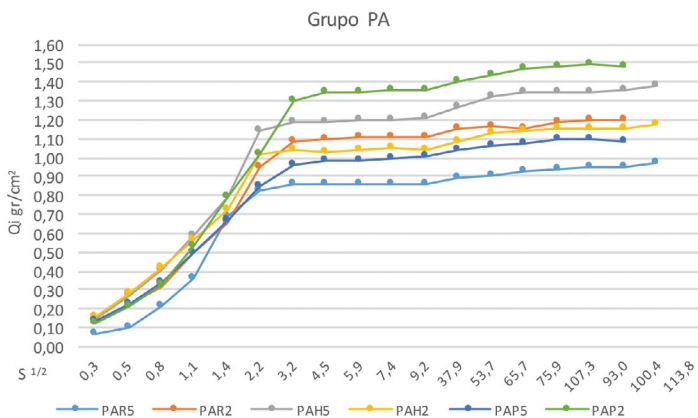


Grafico 5.6 Curvas de absorción para el grupo realizado mediante cal apagada por pudrición con arena blanca y aditivos orgánicos.

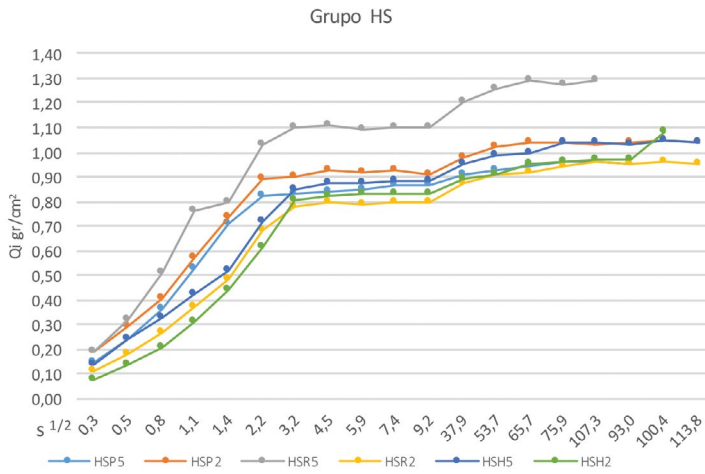


Grafico 5.7 Curvas de absorción para el grupo realizado mediante cal apagada por mezclado en caliente, con *Sascab* y aditivos orgánicos.

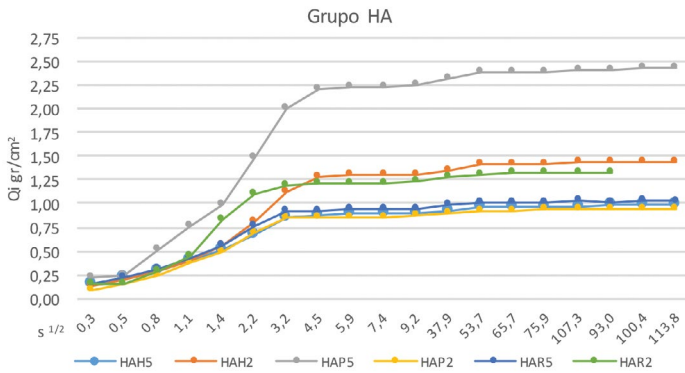


Grafico 5.8 Curvas de absorción para el grupo realizado mediante cal apagada por mezclado en caliente, con arena blanca y aditivos orgánicos.



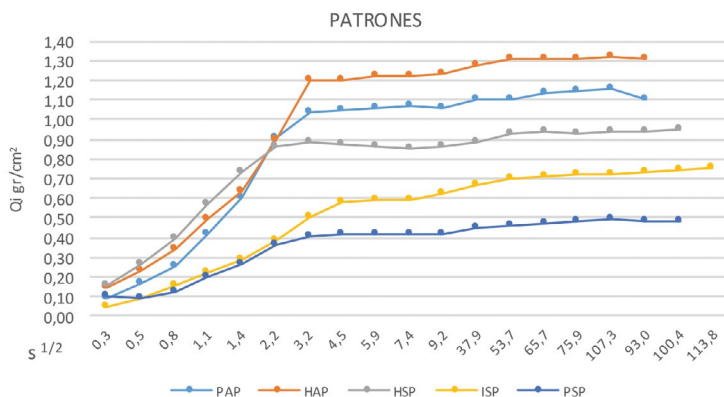


Gráfico 5.9 Curvas de absorción para el grupo de probetas patrón de todos los grupos técnicos.

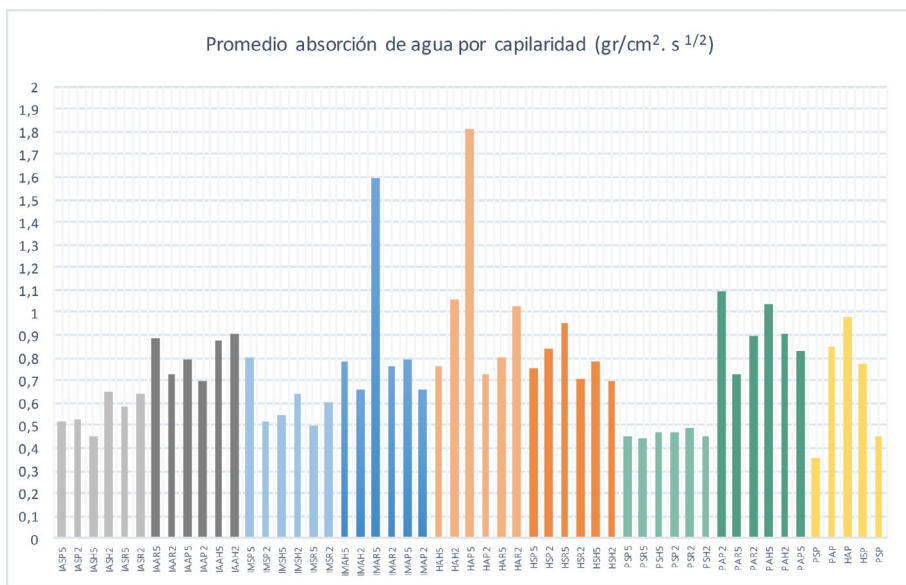


Gráfico 5.10 Promedio de absorción de agua por capilaridad de cada variante de mortero.

En el Gráfico 5.10 se muestran los coeficientes de absorción de todos los grupos ensayados, que se sitúan en rangos similares que van de 0,4 y 1,00  $\text{gr/cm}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ . En todos los grupos técnicos, se observa que los morteros realizados con la arena blanca del sitio tienen una absorción mayor que los realizados con *Sascab*, sin apreciarse diferencias con respecto al tipo de aditivo o el porcentaje de éste añadido. El grupo que menos absorción presenta es el PS (realizado con cal apagada por pudrición con *Sascab*), con absorciones muy similares en cada uno de sus aditivos (entre 0,44 y 0,49  $\text{gr/cm}^2$ ), pero ligeramente superiores al mortero patrón de este mismo grupo (0,36  $\text{gr/cm}^2$ ).

## 5.2.2 Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica

Este ensayo se ha realizado bajo la normativa española UNE-EN 13755:2008 (CEN<sup>®</sup>), que especifica un método para determinar la absorción de agua por inmersión a presión atmosférica. La absorción de agua a presión atmosférica  $A_b$  de cada probeta, se calcula por medio de la ecuación:

$$A_b = \frac{m_s - m_d}{m_d} \cdot 100$$

Siendo  $A_b$  la absorción de agua a presión atmosférica,  $m_s$  la masa de la probeta saturada y  $m_d$  la masa inicial en seco de la probeta. El resultado se expresa como un porcentaje, redondeando al 0,1% más próximo.

### 5.2.2.1 Metodología de ensayo

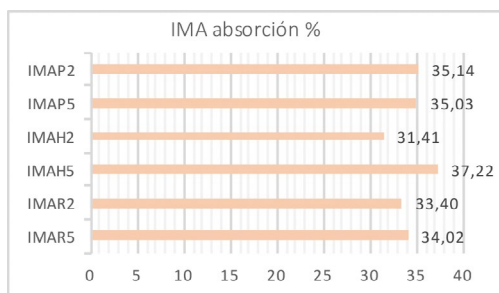
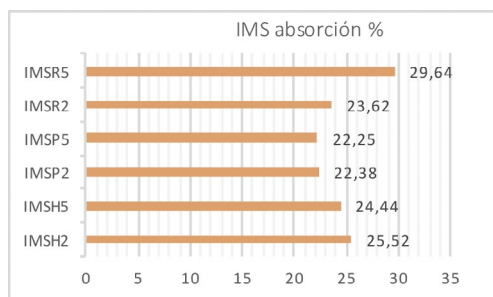
Se han empleado dos probetas de cada tipo de mortero de 4x4x2 cm. Antes del ensayo éstas se han secado a masa constante ( $m_d$ ), en estufa de aire caliente a 60°C, y se han dejado enfriar a temperatura ambiente (20°C). Las probetas se introducen en un contenedor con capacidad para ser cubiertas con agua. Se añade agua hasta la mitad de la altura de éstas. En el tiempo  $t_0 + (60)$  min, se añade agua corriente hasta alcanzar tres cuartas partes de la altura de las probetas. En tiempo  $t_0 + (120)$  min, se añade agua corriente hasta que las probetas queden sumergidas bajo una lámina de agua de al menos 25 mm de espesor (Fig.5.18). En el tiempo  $t_0 + (48+2)$  h se sacan las probetas y tras eliminar el exceso de agua se pesan con una exactitud de 0,01g ( $m_i$ ). Se continúa el ensayo pesando la masa cada 24h y anotando las sucesivas masas ( $m_i$ ), hasta alcanzar la masa constante en saturación ( $m_s$ ) (cuando la diferencia entre dos pesadas consecutivas no supere el 0,1% de la masa de la primera).



Figura 5.18 Ensayo de absorción de agua a presión atmosférica, grupo técnico IMA.

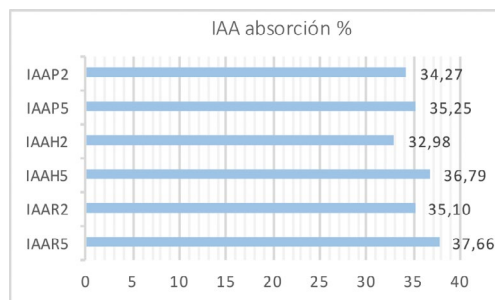
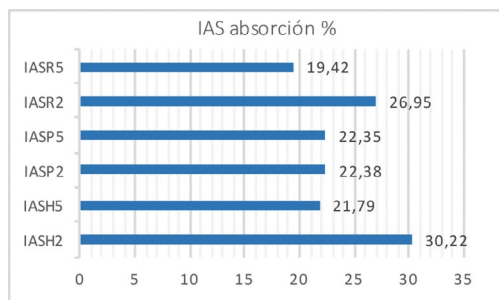
### 5.2.2.2 Resultados del ensayo

Tras el cálculo de los porcentajes de masa ganados, se observa un rango medio de ganancia en el peso del conjunto de probetas que oscila entre el 20 y el 40%. Para el grupo técnico IM realizado con cal apagada mediante agua macerada, *Sascab* (IMS) y arena blanca (IMA), se observa un menor porcentaje de absorción para el grupo realizado con *Sascab*, (22,25-29,64%) que para el realizado con arena blanca del sitio (31,41-37,22%) (Gráficos 5.11 y 5.12).



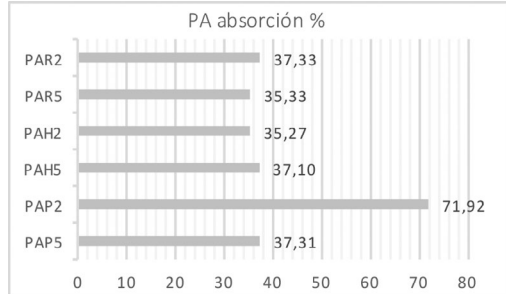
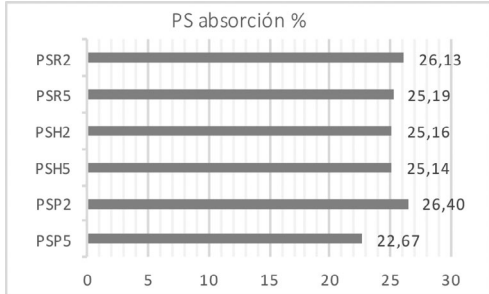
Gráficos 5.11 y 5.12. Grupo técnico IM (cal apagada por inmersión en agua macerada+ *Sascab* = IMS; + arena blanca= IMA). Porcentajes de agua absorbida.

No se aprecian patrones de absorción que respondan a un determinado tipo de exudado, ni a un porcentaje determinado, hallando diferencias significativas para un mismo exudado y porcentaje, en ambos grupos. Por ejemplo, mientras IMP2 presenta un porcentaje de masa ganada bajo en el grupo realizado con *Sascab* (22,38%), tiene el segundo porcentaje más alto en el grupo realizado con arena blanca (35,14%). El grupo técnico IA se comporta de forma similar, siendo el grupo realizado con *Sascab* (IAS), de nuevo el que menor porcentaje de agua absorbida registra en conjunto (19,42-30,22%); frente al rango de agua que absorbe el grupo realizado con arena blanca (32,98-37,66%) (Gráficos 5.13 y 5.14).



Gráficos 5.13 y 5.14. Grupo técnico IA (Cal apagada por inmersión en agua corriente + *Sascab* = IAS; + arena blanca= IAA). Porcentajes de agua absorbida.

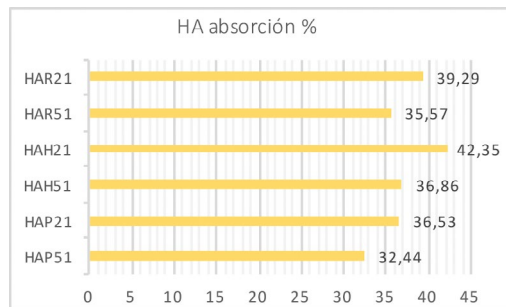
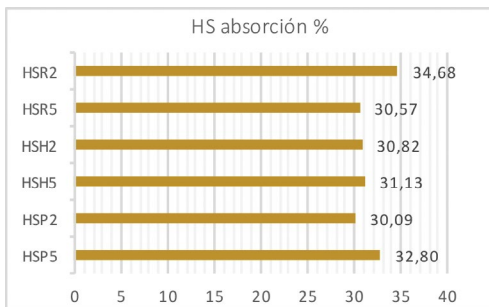
En los grupos técnicos P y H, de nuevo encontramos el mismo patrón de comportamiento con respecto a los áridos con que se han elaborado los morteros. Tanto el grupo PS como el HS, realizados con *Sascab*, presentan un rango de absorción de agua menor que los grupos PA y HA, realizados con la arena blanca (Gráficos 5.15-5.18).



Gráficos 5.15 y 5.16. Grupo técnico P. Porcentajes de agua absorbida.

Tampoco se observan diferencias entre los distintos tipo de aditivos orgánicos incorporados ni con respecto a sus porcentajes de concentración en el mortero; por lo que el factor directo que determina una mayor absorción de agua del mortero es el árido que lo compone, posiblemente debido a que el *Sascab*, de granulometría menor, ofrece un mortero con menor porosidad.

Para determinar la influencia de los aditivos orgánicos en el mortero, resulta indispensable la comparación de éstos con las probetas patrón, realizadas siguiendo la misma metodología que su grupo técnico, pero sin la adición de exudados orgánicos. En este caso, solo es destacable la absorción de agua de la probeta patrón ISP (Grupo técnico IMS-IAS), que presenta un porcentaje de ganancia bastante inferior (11,30%) a las probetas de su grupo realizadas con aditivos (22,25-30,22%) (Gráfico 5.19). El resto de probetas patrón presentan absorciones comprendidas en los baremos de su grupo técnico; por lo que no se puede determinar que la adición de los aditivos orgánicos, independientemente del tipo y porcentaje, influyan en la absorción de agua a presión atmosférica.



Gráficos 5.17 y 5.18. Grupo técnico H. Porcentajes de agua absorbida.

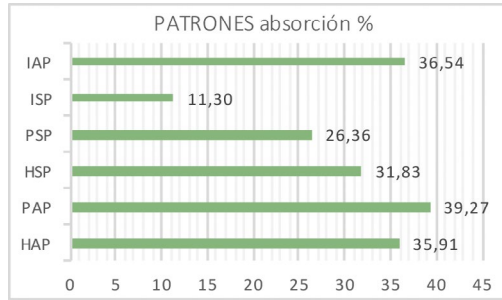
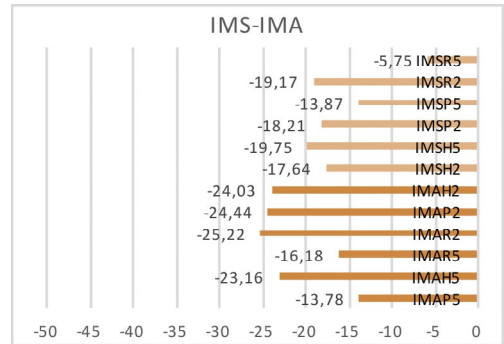
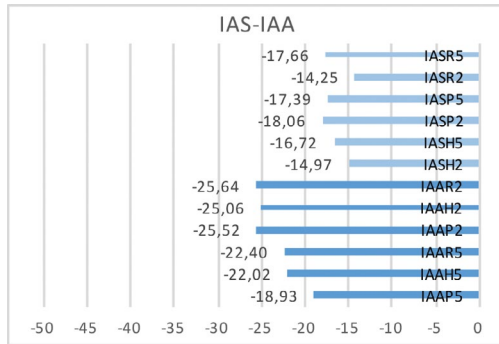


Gráfico 5.19. Grupo PATRON. Porcentajes de agua absorbida.

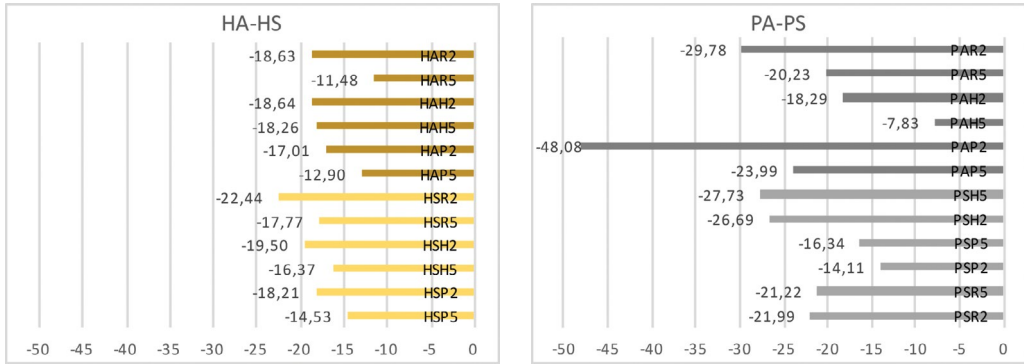
### 5.2.2.3 Desorción de agua a presión atmosférica

Mediante el ensayo de desorción libre de agua se puede comprobar la velocidad de evaporación del agua de los morteros saturados, así como la cantidad de agua (%) que queda retenida en la estructura porosa, en un determinado tiempo. Esto puede estar determinado por la diferencia del tamaño de los poros de cada tipo de mortero, así como de la adición de aditivos vegetales que pueden actuar como retenedores de agua.

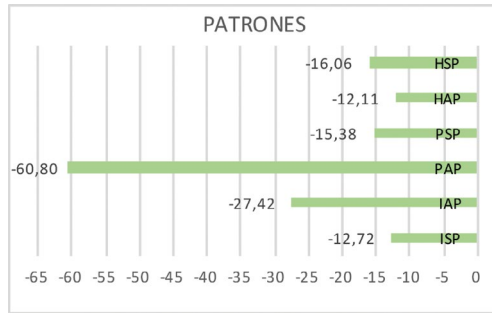
Después de llegar a saturación ( $m_s$ ) en el ensayo de absorción, las probetas se sellan por la base y el perímetro lateral con Parafilm<sup>®</sup>M, de modo que sólo quede libre el área superior, y se disponen sobre una rejilla con la superficie libre hacia arriba. Cada 24h se anota la masa ( $m_d$ ) de cada probeta hasta masa constante (cuando la diferencia entre dos pesadas consecutivas no supere el 0,1% de la masa de la primera), o el tiempo establecido para el ensayo. Los cálculos para expresar los resultados de pérdida de masa (%) se realizan mediante idéntica ecuación, obteniendo esta vez cifras en negativo.



Gráficos 5.20 y 5.21. Grupos IA e IM, porcentajes de masa desorbida a las 192h.



Gráficos 5.22 y 5.23 Grupos H y P, porcentajes de masa desorbida a las 192h.



Gráficos 5.24 Grupo patrón, porcentajes de masa desorbida a las 192h.

El comportamiento de la desorción se produce de forma similar que la absorción de agua, siendo mayor en las probetas realizadas con arena blanca que con *Sascab*, dentro del mismo grupo técnico (Gráficos 5.20-5.24). Esto puede ser debido a la mayor porosidad que ofrece esta arena de granulometría mayor y más heterogénea. A las 192h de ensayo, el porcentaje de pérdida de masa es superior en las probetas realizadas con arena que en las que se componen con *Sascab*, que aún poseen gran parte de masa de agua (%) retenida en el interior.

### 5.2.3 Determinación de la permeabilidad al vapor de agua

Con este ensayo se pretende comprobar la transpiración de los estucos fabricados y la influencia que las distintas gomas vegetales y los distintos procedimientos de apagado de la cal tienen en la porosidad y permeabilidad de estos estucos. Este parámetro es de gran importancia ya que el estuco susceptible de ser empleado en la restauración de los revestimientos originales, ha de ser lo suficientemente permeable para favorecer la libre transpiración de la humedad contenida en el soporte pétreo, así como evitar la cristalización de sales solubles entre ambos estratos (Carrascosa y Lorenzo 2012).

Este ensayo se ha realizado bajo la normativa española UNE-EN 15803-2010 (CEN®) con el objeto de determinar la transferencia de vapor de agua a través de una probeta sometida a diferentes presiones parciales de vapor de agua. Se ha empleado el método de cubeta húmeda, que proporciona directrices acerca de las prestaciones de los materiales bajo condiciones de humedad elevada. Los resultados se expresan en relación a la variación de la masa acumulada ( $\Delta m_i$ ), aplicando la fórmula:

$$|\Delta m_i| = (m_i - m_o)/m_i \cdot 100$$

Siendo  $m_i$  y  $m_o$  la masa del dispositivo de ensayo en los tiempos  $t_i$  y  $t_o$  respectivamente, en gr. De los cambios de masa en función de tiempo se determina la pendiente de línea de regresión (G) en gr/s, necesaria para determinar el flujo de vapor de agua (g) en gr/s.cm<sup>2</sup> (Barbero 2002:979).

$$g = \frac{G}{A}$$

Donde G es la masa de vapor de agua transferido en función del tiempo ( $t$ )=  $\Delta m/\Delta t$  en gr/s. y A es el área de la superficie de la probeta en cm<sup>2</sup>, obtenida de la media aritmética de las dos superficies de ensayo. La permeancia al vapor de agua (W) en gr/cm<sup>2</sup>.h.Pa, se obtiene mediante:

$$W = \frac{G}{A \cdot \Delta p_v}$$

Donde  $p_v$  se calcula a partir de las medias de la temperatura y humedad relativa registradas durante el ensayo:

$$P_v = P_{sat}^{HR} = P_{sat} \cdot \frac{(HR1 + HR2) 2}{100}$$

Y la presión de vapor ( $P_{sat}$ ), dado que la temperatura es mayor de 0°C, a partir de la expresión:

$$P_{sat} = 610.5 \cdot e^{\frac{17.269 \cdot 0}{237.3 + 0}}$$

Donde 0 se sustituye por la temperatura media registrada en el ensayo (23°C). Finalmente se calcula la permeabilidad al vapor de agua (gr/cm<sup>2</sup>.s.P), mediante la fórmula (UNE EN 15803-2010):

$$\delta = W \cdot d$$

Obtenida mediante la multiplicación de la permeancia al vapor de agua (W) por el espesor de la probeta ensayada, en cm.

### 5.2.3.1 Metodología de ensayo

La probeta se monta sobre un recipiente que contiene una solución saturada de nitrato potásico ( $\text{KNO}_3$ ), y se sella el perímetro de unión mediante Parafilm®M. Debido a la diferente presión parcial del vapor de agua existente entre el interior de la cubeta de ensayo y la cámara de ensayo, se produce un flujo de vapor de agua a través de la probeta. Se determina la variación de la masa mediante pesadas consecutivas. Para este ensayo se han empleado tres probetas circulares de cada tipo de mortero, con unas dimensiones de  $1 \times 4 \text{ cm } \varnothing$ , siendo un total de 162 probetas (Fig.5.19). Se acondicionaron en una cámara estanca con material desecante para conseguir unas condiciones de  $22^\circ\text{C}$  y 50% HR, estabilizando sus pesos hasta masa constante (cuando la diferencia entre dos pesadas consecutivas (24h) no es superior al 0,1% de la masa de la probeta).

El ensayo se ha realizado en el interior de una campana de extracción para evitar flujos de aire que pudieran alterarlo. Las mediciones de la masa se han llevado a cabo cada 24h durante ocho días.



Figura 5.19 Ensayo de permeabilidad al vapor de agua durante la medición de la variación de la masa ( $m_t$ ).

### 5.2.3.2 Resultados del ensayo

Al observar la curva resultante de calcular la variación de masa acumulada, se define un patrón de comportamiento claro en los grupos técnicos IMA e IAA, realizados con arena del sitio como carga. En estos grupos, los morteros realizados con el mayor porcentaje de aditivo orgánico (2%), experimentan una mayor pérdida de masa (gr/s), que los realizados con un 0,5% de aditivo; lo que paradójicamente significa que la mayor adición de estos exudados no afecta a la permeabilidad el mortero. En los mismos grupos técnicos realizados con *Sascab* como carga (IMS e IAS), no se aprecia esta fase, sino que todos los morteros experimentan un incremento muy similar de la masa ganada (Tabla 5.6). Del mismo modo, el resto de grupos técnicos HS, HA, PS y PA (Gráficos 5.29-5.32), reflejan variaciones de masa muy similares, sin diferencias entre el porcentaje de aditivo del mortero. Los morteros patrón reflejan curvas y absorciones similares a su grupo técnico.



Tabla 5.6 Determinación de la permeabilidad al vapor de agua ( $\Delta m_i$  (%) en gr; caudal del vapor de agua a través de la probeta (G) en  $\text{gr}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$  y permeabilidad al vapor de agua ( $\delta_p$ ) en  $\text{gr}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ . Desviación estándar ( $\delta$ ) en la segunda columna.

PROBETA	$\Delta m_i$ (gr. %) ( $\delta$ )		G ( $\text{gr}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ) ( $\delta$ )		$\delta_p$ $\text{gr}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ( $\delta$ )	
IMAP2	-1,962	1,226	-4,68E-06	9,34E-07	-3,68E-13	7,35E-14
IMAH2	-1,909	1,194	-4,55E-06	1,03E-06	-3,58E-13	8,09E-14
IMAR2	-2,180	1,186	-5,34E-06	9,74E-07	-3,78E-13	6,89E-14
IMAP5	-1,021	0,601	-2,55E-06	3,41E-07	-1,80E-13	2,41E-14
IMAR5	-1,158	0,691	-2,88E-06	3,99E-07	-2,04E-13	2,82E-14
IMAH5	-0,998	0,688	-2,31E-06	7,39E-07	-1,99E-13	6,39E-14
IMSP5	-1,339	0,832	-3,16E-06	5,17E-07	-2,73E-13	4,47E-14
IMSP2	-1,379	0,808	-3,39E-06	2,88E-07	-2,93E-13	2,49E-14
IMSR5	-1,405	0,816	-3,49E-06	3,43E-07	-2,47E-13	2,42E-14
IMSR2	-1,400	0,845	-3,38E-06	3,72E-07	-2,66E-13	2,93E-14
IMSH5	-1,234	0,750	-2,98E-06	3,48E-07	-2,34E-13	2,73E-14
IMSH2	-1,531	0,918	-3,71E-06	3,98E-07	-2,91E-13	3,13E-14
IAAH5	-1,190	0,674	-3,04E-06	3,93E-07	-2,39E-13	3,09E-14
IAAP5	-1,268	0,716	-3,25E-06	4,27E-07	-2,81E-13	3,70E-14
IAAR5	-1,048	0,642	-2,57E-06	3,94E-07	-1,82E-13	2,79E-14
IAAH2	-1,959	0,988	-4,93E-06	1,03E-06	-3,49E-13	7,27E-14
IAAR2	-1,956	0,997	-4,89E-06	1,09E-06	-4,23E-13	9,46E-14
IASP5	-1,276	0,779	-3,05E-06	4,08E-07	-2,40E-13	3,21E-14
IASP2	-1,299	0,781	-3,13E-06	3,71E-07	-2,46E-13	2,92E-14
IASR5	-1,119	0,686	-2,67E-06	3,75E-07	-2,10E-13	2,95E-14
IASR2	-1,451	0,867	-3,50E-06	4,09E-07	-2,75E-13	3,21E-14
IASH5	-1,328	0,804	-3,22E-06	3,45E-07	-2,53E-13	2,71E-14
IASH2	-1,652	1,000	-3,97E-06	4,73E-07	-2,81E-13	3,35E-14
PSP5	-2,166	1,099	-5,56E-06	1,71E-06	-3,93E-13	1,21E-13
PSP2	-1,487	0,948	-3,73E-06	8,48E-07	-2,35E-13	5,34E-14
PSR5	-1,889	0,920	-5,37E-06	2,01E-06	-3,80E-13	1,42E-13
PSR2	-3,119	1,469	-8,16E-06	2,90E-06	-5,13E-13	1,82E-13
PSH5	-10,365	4,111	-2,87E-05	1,78E-05	-2,03E-12	1,26E-12
PSH2	-6,742	2,717	-1,84E-05	1,03E-05	-1,45E-12	8,08E-13
PAH5	-1,152	0,745	-2,76E-06	6,63E-07	-2,17E-13	5,21E-14
PAH2	-1,312	0,756	-3,32E-06	4,24E-07	-2,35E-13	3,00E-14
PAP5	-1,240	0,718	-3,12E-06	3,65E-07	-1,96E-13	2,29E-14
PAR5	-1,272	0,731	-3,23E-06	4,09E-07	-2,03E-13	2,57E-14
PAR2	-1,033	0,612	-2,57E-06	3,63E-07	-2,02E-13	2,86E-14
HSR5	-1,158	0,651	-2,96E-06	3,78E-07	-2,32E-13	2,97E-14
HSR2	-1,038	0,503	-2,84E-06	6,46E-07	-2,24E-13	5,08E-14
HSP5	-1,133	0,640	-2,27E-01	1,28E-01	-1,78E-08	1,01E-08
HSP2	-1,017	0,601	-2,53E-06	3,34E-07	-1,79E-13	2,36E-14
HSH2	-1,083	0,640	-2,71E-06	4,25E-07	-1,92E-13	3,01E-14
HSH5	-1,072	0,731	-2,51E-06	8,26E-07	-1,78E-13	5,84E-14
HAP5	-0,984	0,590	-2,43E-06	3,41E-07	-2,10E-13	2,95E-14
HAP2	-0,987	0,595	-2,43E-06	3,42E-07	-1,72E-13	2,42E-14
HAH2	-1,043	0,600	-2,65E-06	3,35E-07	-1,87E-13	2,37E-14
HAR5	-1,076	0,621	-2,71E-06	3,46E-07	-1,92E-13	2,45E-14
HAR2	-1,048	0,642	-2,57E-06	3,94E-07	-2,02E-13	3,09E-14
HSP	-1,085	0,624	-2,74E-06	3,50E-07	-2,16E-13	2,76E-14
HAP	-1,096	0,623	-2,79E-06	3,56E-07	-2,19E-13	2,80E-14
PSP	-5,538	2,239	-1,51E-05	7,87E-06	-1,19E-12	6,19E-13
ISP	-1,229	0,752	-2,94E-06	3,74E-07	-2,31E-13	2,94E-14
IAP	-2,424	1,182	-6,20E-06	1,35E-06	-4,88E-13	1,06E-13
PAP	-1,091	0,646	-2,70E-06	3,71E-07	-2,13E-13	2,92E-14

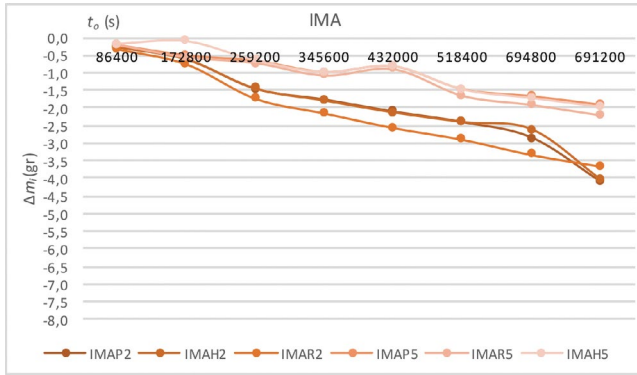


Gráfico 5.25 Variación de la masa acumulada  $\Delta m_i$ (gr), en función del tiempo  $t_o$ (s).

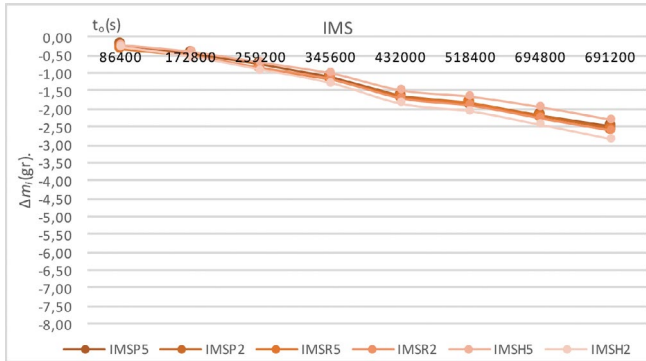


Gráfico 5.26 Variación de la masa acumulada  $\Delta m_i$ (gr), en función del tiempo  $t_o$ (s).

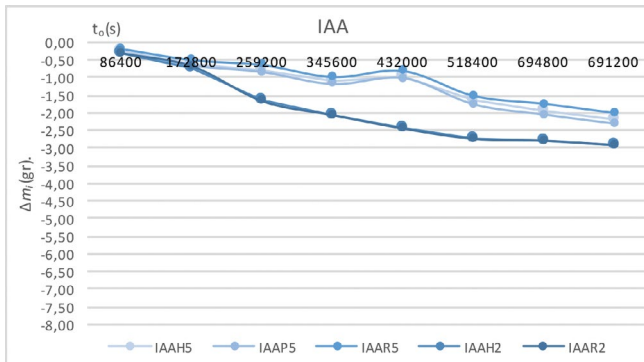


Gráfico 5.27 Variación de la masa acumulada  $\Delta m_i$ (gr), en función del tiempo  $t_o$ (s).

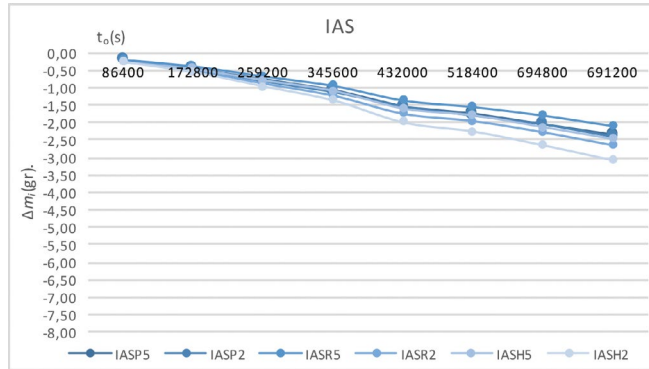


Gráfico 5.28 Variación de la masa acumulada  $\Delta m_i$ (gr), en función del tiempo  $t_i$ (s).

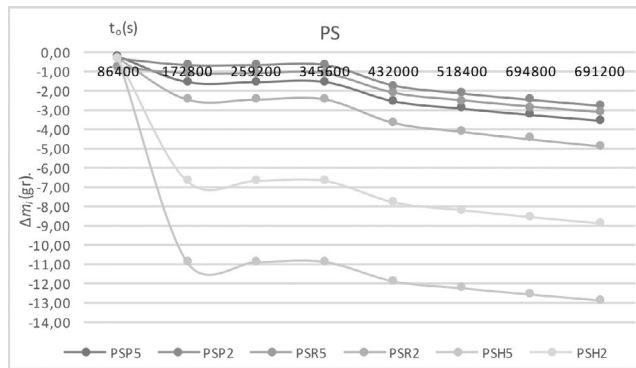


Gráfico 5.29 Variación de la masa acumulada  $\Delta m_i$ (gr), en función del tiempo  $t_i$ (s).

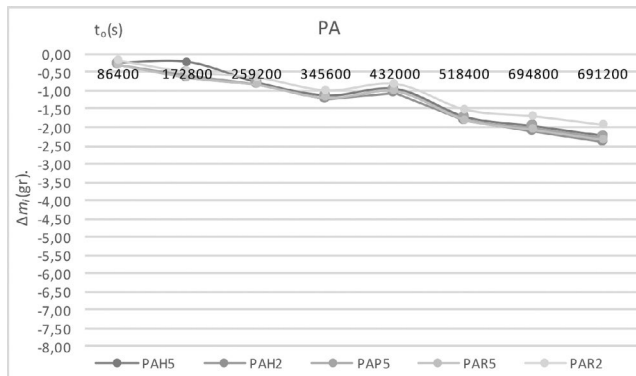


Gráfico 5.30 Variación de la masa acumulada  $\Delta m_i$ (gr), en función del tiempo  $t_i$ (s).

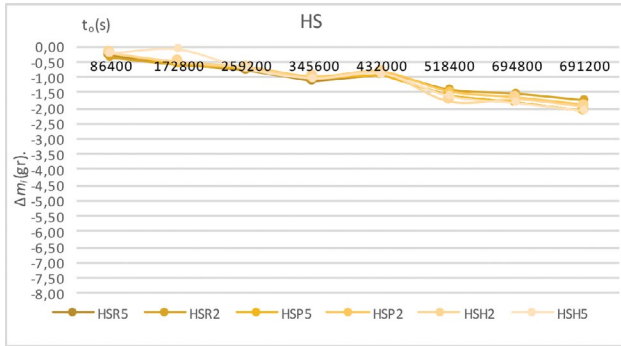


Gráfico 5.31 Variación de la masa acumulada  $\Delta m_i$ (gr), en función del tiempo  $t_i$ (s).

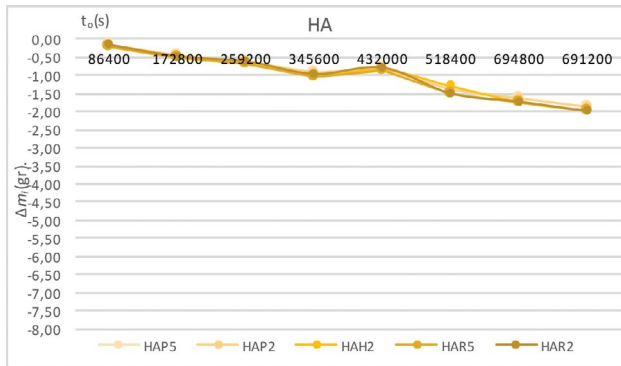
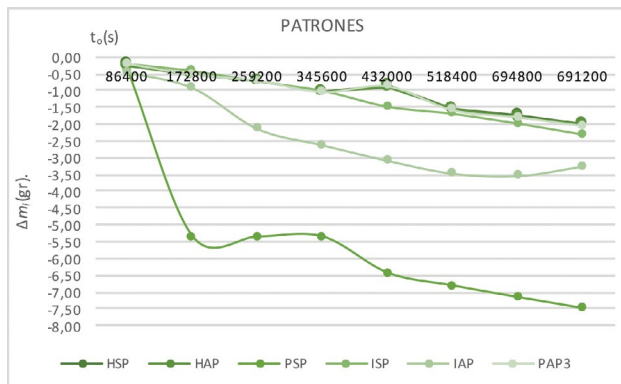


Gráfico 5.32 Variación de la masa acumulada  $\Delta m_i$ (gr), en función del tiempo  $t_i$ (s).



Gráficos 5.33. Variación de la masa acumulada  $\Delta m_i$ (gr), en función del tiempo  $t_i$ (s).

En los gráficos resultantes del cálculo de la permeabilidad al vapor de agua en función del tiempo ( $gr/cm^2 \cdot s \cdot P$ ), se observan dos comportamientos destacados. Los grupos técnicos IMS e IAS, realizados mediante el apagado de la cal por inmersión, en agua de maceración y en agua corriente respectivamente, ambos con *Sascab* como carga, muestran una permeabilidad gradual y regular a lo largo del ensayo. Estos mismos grupos realizados con arena del sitio (IMA e IAA), se muestran más irregulares, con algunos altibajos marcados. Los grupos técnicos PS, PA, HS y HA también se muestran irregulares, con picos inestables (Gráficos 5.34-5.42). Esta disparidad en los grupos ensayados puede deberse a una diferencia de homogeneidad en la estructura del mortero, ya que el *Sascab* junto a la cal (en pasta) apagada por inmersión, producen una pasta muy fina y regular. En cambio, la arena del sitio de mayor granulometría (IMA e IAA), y las cales apagadas por pudrición (PS y PA) y en caliente (HS y HA), generan granulometrías irregulares y una estructura porosa irregular, con mayor incorporación de aire. En el grupo técnico IMA, se observa una clara diferencia entre los morteros realizados con el mayor porcentaje de aditivo (IMAP2, IMAR2 e IMAH2), que muestran menor permeabilidad y los realizados con la adición del 0,5% de aditivo, que muestran mayor permeabilidad. El incremento del porcentaje de aditivo incrementa la incorporación de aire en el mortero que disminuye su densidad y dificulta la difusión del vapor de agua por la red porosa (Guash 2016:343).

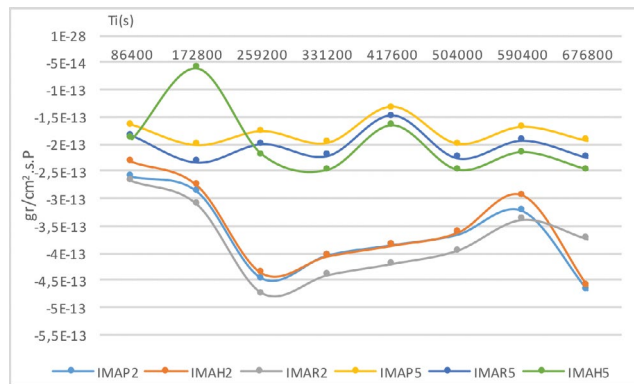


Gráfico 5.34. Permeabilidad al vapor de agua ( $\delta$ ) del grupo técnico IMA.

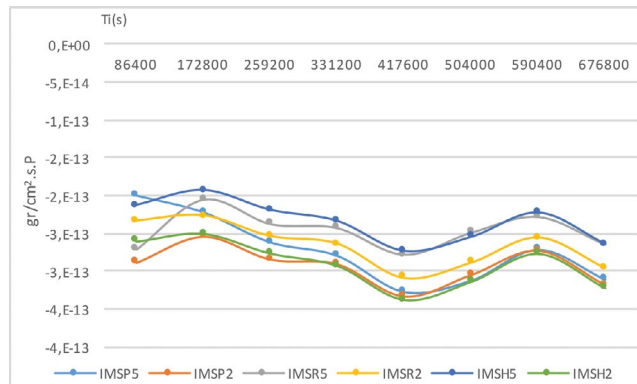


Gráfico 5.35. Permeabilidad al vapor de agua ( $\delta$ ) del grupo técnico IMS.

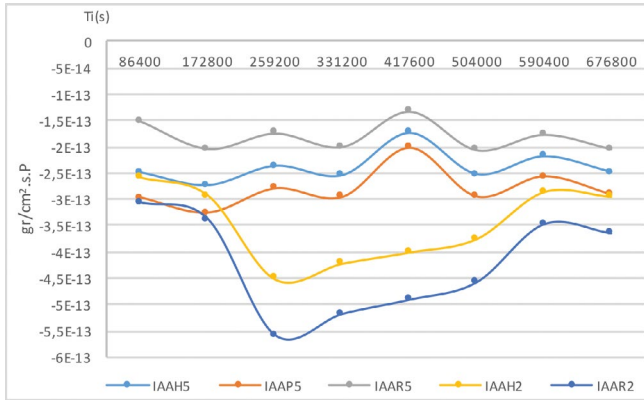


Gráfico 5.36. Permeabilidad al vapor de agua ( $\delta$ ) del grupo técnico IAA.

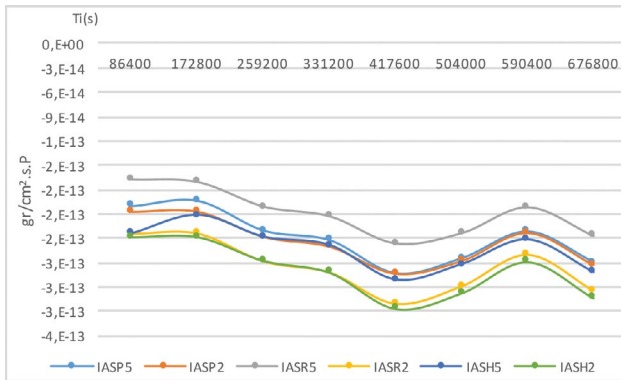


Gráfico 5.37. Permeabilidad al vapor de agua ( $\delta$ ) del grupo técnico IAS.

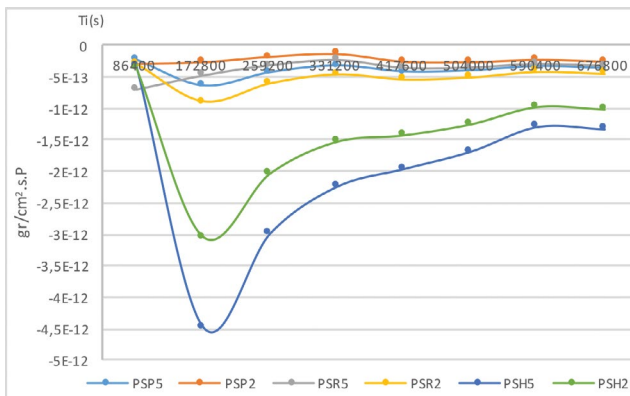


Gráfico 5.38. Permeabilidad al vapor de agua ( $\delta$ ) del grupo técnico PS.

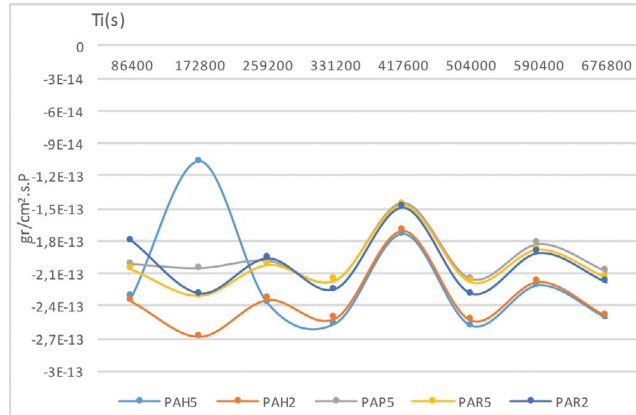


Gráfico 5.39. Permeabilidad al vapor de agua (δ) del grupo técnico PA.

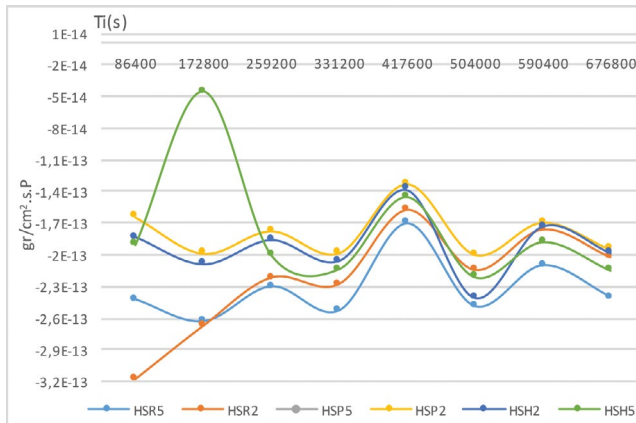


Gráfico 5.40. Permeabilidad al vapor de agua (δ) del grupo técnico HS.

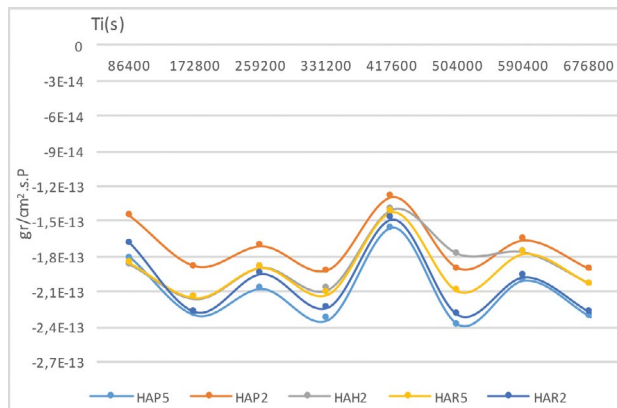


Gráfico 5.41. Permeabilidad al vapor de agua (δ) del grupo técnico HA.

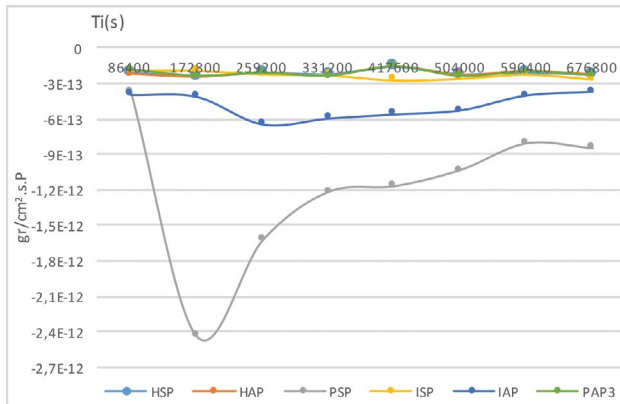


Gráfico 5.42. Permeabilidad al vapor de agua ( $\delta$ ) del grupo de Patrones.

## 5.2.4 Determinación de la resistencia a la carbonatación

Con este ensayo se pretende evaluar la resistencia a la carbonatación que presentan los distintos tipos de mortero propuestos, empleando el procedimiento descrito en la normativa española UNE-EN 13295:2005 (CEN<sup>®</sup>), valorando la profundidad y el frente de carbonatación. El ensayo se basa en un test reactivo del pH de los componentes alcalinos (portlandita) presentes en el mortero. Éstos reaccionan con el  $\text{CO}_2$ , disminuyendo el pH conforme se produce la carbonatación de 12 a 8,3 pH (Cazalla 2002: 29); por lo que se puede saber si una probeta de mortero contiene portlandita, calcita o ambas fases minerales, así como evaluar la evolución de la carbonatación en el tiempo.

### 5.2.4.1 Condiciones de ensayo

Para realizar este ensayo, se empleó una probeta de cada tipo de mortero de 4x4x2 cm. El conjunto se curó al aire libre durante 365 días en unas condiciones ambientales de  $(22 \pm 5^\circ\text{C}/70 \pm 5\% \text{HR})$ . Después de este tiempo se procedió al ensayo para el cual las probetas fueron partidas longitudinalmente para obtener un corte de sección fresco y limpio. Inmediatamente se rocía la superficie obtenida mediante una solución de fenolftaleína<sup>2</sup>, que como se ha indicado anteriormente reacciona con los componentes más alcalinos, mostrando una coloración que varía del rosa al fucsia intenso en función del pH.

### 5.2.4.2 Resultados del ensayo

- o Grupo IMA (Apagado por inmersión en macerados + arena del sitio): En este grupo se observan tres procesos distintos de carbonatación en función del tipo de aditivo empleado. Las realizadas con Ramón presenta una carbonatación casi completa en el mortero de menor porcentaje (IMAR5), mientras que el realizado con el 2% de aditivo (IMAR2), se encuentra muy poco carbonatada con una coloración fucsia generalizada. Los morteros aditivados con

<sup>2</sup> Compuesta por 1gr del indicador fenolftaleína en una disolución de 70ml de etanol y 30 ml de agua desmineralizada (UNE-EN 013295).



Pixoy manifiestan mayor resistencia a la carbonatación, mostrando ambas probetas gran parte de coloración fucsia, en forma de anillo o núcleo central en IMA5, y en prácticamente toda la superficie en IMA2. Las probetas realizadas con Habín se muestran por el contrario completamente carbonatadas, a excepción de algunas partículas aleatorias en IMAH5, que presentan tinción fucsia, probablemente correspondientes a nódulos de cal no carbonatada.

- o Grupo IMS (Apagado por inmersión en macerados + *Sascab*): A pesar de pertenecer al mismo grupo técnico, estos morteros realizados con *Sascab* como árido, muestran una resistencia a la carbonatación elevada, sin diferenciación que atienda a los aditivos vegetales empleados. Todas las probetas (Ramón, Pixoy y Habín) muestran una carbonatación perimetral, en al menos dos de los cuatro laterales, con una profundidad media de 2mm. La probeta patrón, se muestra exactamente igual, con lo que se evidencia que en este caso la resistencia a la carbonatación no viene dada por los aditivos presentes en los morteros, sino por el árido empleado (Fig. 5.20).



Fig. 5.20 Grupo técnico IMA (Izda.)-IMS (Dcha.)

- o Grupo IAA (Cal apagada por inmersión en agua+ arena del sitio+macerados en el agua del mortero): Este grupo de morteros presenta una carbonatación prácticamente completa salvo algunas partículas resaltadas en fucsia por su elevado pH. La probeta con aporte de Pixoy al 0,5% (IAAP5) presenta un pequeño núcleo central en proceso de carbonatación, y algunas partículas dispersas al igual que IAAR5 e IAAH5. Las probetas con mayor aporte de aditivos IAAP2 e IAAH2 muestran una veladura superficial y homogénea de coloración rosácea, debido a una mayor área en proceso de carbonatación. Tanto IAAR2 como la probeta patrón se muestran totalmente carbonatadas (Fig.5.21).
- o Grupo IAS (Cal apagada por inmersión en agua+ *Sascab* + macerados en el agua del mortero): Al igual que el anterior grupo técnico, las probetas realizadas con *Sascab* como carga presentan una elevada resistencia a la carbonatación, exhibiendo una superficie homogénea con una fuerte coloración fucsia que evidencia un alto pH por una carbonatación poco desarrollada.



Fig. 5.21 Grupo técnico IAA (Izda.)-IAS (Dcha.)

- o Grupo PA (Cal apagada por pudrición+ arena del sitio + macerados en agua del mortero): Este conjunto de mortero presenta una carbonatación avanzada en general, de entre la que se distingue una mayor resistencia a las probetas elaboradas con el aditivo en menor proporción, ya que presentan un pequeño núcleo central en coloración fucsia (Fig.5.22). En las probetas elaboradas con el aporte de Habín, también es patente en la probeta realizada con el aditivo al 2%. Ambas muestran una veladura rosácea alrededor de este núcleo y un perímetro muy definido totalmente carbonatado. La probeta patrón se encuentra carbonatada por completo.
  
- o Grupo PS (Cal apagada por pudrición+ *Sascab* + macerados en agua del mortero): En las probetas elaboradas con el aditivo de Ramón (0,5% y 2%) es patente una carbonatación incompleta, formada por diferentes fases de precipitación de calcita, que se manifiesta por medio de anillos concéntricos. Mientras el núcleo central se mantiene fucsia, el perímetro se encuentra perfectamente definido por una profundidad de carbonatación de 3mm de media. Los morteros realizados con el macerado de Pixoy evidencian una variación en la resistencia a la carbonatación, siendo mayor en la probeta que tiene más aditivo (PSP2), que muestra una coloración superficial fucsia, con un perímetro carbonatado de 3mm de media. Las probetas realizadas con el macerado de Habín presentan menor resistencia a la carbonatación que las anteriores, con sólo una coloración rosácea en la zona central. La probeta patrón se halla totalmente carbonatada.



Fig. 5.22 Grupo técnico PA (izda.)-PS (Dcha.)

- o Grupo HA (Cal apagada por mezclado en caliente con arena del sitio+ macerados): este grupo técnico presenta un proceso de carbonatación similar al anterior al ser visibles los anillos o fases de precipitación. Los morteros apagados con macerado de Ramón presentan igual estadio de carbonatación independientemente del aporte de aditivo (0,5-2%). Muestran un perímetro altamente carbonatado con un núcleo central en proceso. Los morteros realizados con Pixoy difieren conforme a la cantidad añadida, siendo el que mayor cantidad contiene (HAP2), el que menos resistencia a la carbonatación presenta. Los morteros realizados con Habín ofrecen menor resistencia a la carbonatación en comparación, con una profundidad de carbonatación de 7mm de media. La probeta patrón, realizada sin aditivos se encuentra muy poco carbonatada y puede ser comparada con HAR5 y HAR2.
- o Grupo HS (Cal apagada por mezclado en caliente con *Sascab* + macerados): Se muestran anillos definidos en los morteros HSR5 y HSR2 con un núcleo fucsia que se concentra en el centro, y una coloración rosácea en el resto de la superficie (Fig.5.23). Presentan un perímetro muy definido de carbonatación, de 2mm de profundidad. En la probeta HSP5 se observa un superficie rosácea con un núcleo o anillo fucsia bien definido, mientras que en HSP2 no existe núcleo central pero sí partículas dispersas resaltadas por la tinción. En HSH5 la carbonatación está poco desarrollada, observándose de forma sutil un perímetro muy fino de carbonatación y un anillo de carbonatación. HSH2 se encuentra más carbonatada con un patrón muy parecido a HSR5 o HSP5. La probeta patrón muestra una resistencia a la carbonatación más elevada, con una coloración fucsia casi en toda la superficie.



Fig. 5.23 Grupo técnico HA (izda.)-HS (Dcha.)

### 5.2.5 Determinación de la densidad aparente

Este ensayo tiene como objeto describir la densidad aparente<sup>3</sup> en seco de los morteros endurecidos, obteniendo información acerca de la estructura y porosidad interna del material, factores que afectan directamente a la resistencia del material. El ensayo se ha realizado según la normativa española UNE-EN 1015:10 (CEN<sup>®</sup>).

La densidad aparente en seco ( $D_{ap, sec}$ ) de cada probeta de mortero se calcula dividiendo la masa de la probeta secada en estufa ( $m_{s, sec}$ ) en Kg, por el volumen de la probeta del mortero endurecido ( $V_s$ ), en m<sup>3</sup>. El volumen de la probeta en m<sup>3</sup> se calcula mediante la fórmula:

$$V_s = \frac{m_{s, sat} - m_{s, i}}{\rho_w}$$

Donde  $m_{s, sat}$  es la masa de la probeta saturada de agua en Kg;  $m_{s, i}$  la masa aparente de la probeta saturada sumergida en agua en Kg y  $\rho_w$  es la densidad del agua, en Kg/m<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> f. La densidad aparente de un material es la relación entre el volumen y el peso en seco, incluyendo los huecos y poros que contenga, sean aparentes o no. [www.Construmatica.com/construpedia/densidad\\_aparente](http://www.Construmatica.com/construpedia/densidad_aparente) (consultado 25/1/2018).

### 5.2.5.1 Metodología de ensayo

Se ha empleado una probeta de cada tipo de mortero de dimensiones 4x4x2 cm, que han sido secadas en estufa caliente a 60°C, hasta alcanzar masa constante (cuando la diferencia entre dos pesadas consecutivas (2h) no difiere en más de 0,2% de la masa de la probeta seca). Se anota la masa de la probeta seca  $m_{s,sec}$ . Para determinar el volumen de la probeta por desplazamiento volumétrico, ésta se sumerge en agua (20°C) hasta masa constante (saturación) y se anota  $m_{s,sat}$ . La probeta saturada se coloca en el estribo porta-probeta de la balanza para realizar la pesada hidrostática y se anota la masa  $m_{s,i}$ . Obtenidos los tres datos, se realizan los cálculos para obtener la densidad aparente en seco del mortero endurecido  $D_{ap,sec}$ .

### 5.2.5.2 Resultados del ensayo

En la tabla 5.7 se muestran los resultados obtenidos para cada tipo de mortero elaborado, determinando en primer lugar el volumen ( $m^3$ ) y la densidad aparente en seco ( $D$  Kg/ $m^3$ ). De los cuatro grupos técnicos se aprecian mayores densidades en los grupos que llevan en su composición *Sascab* como agregado (PS, HS, IMS, IAS), tal como se aprecia en los promedios del gráfico 5.43. Los morteros de cada grupo realizados con arena blanca (PA, HA, IMA, IAA) presentan valores considerablemente menores. Con respecto a la adición de las gomas vegetales, no se observan pautas de incremento o disminución de la densidad en ningún tipo de aditivo, ni en ninguna proporción en concreto, si bien las probetas que contienen Pixoy en los grupos PS, PA, HS y HA presentan valores ligeramente más altos. Con respecto a las probetas patrón, se observa que estos morteros, realizados sin aditivos orgánicos, presentan valores muy similares a los morteros de su grupo técnico correspondiente (Gráfico 5.43), con lo que no se puede determinar que la adición de los exudados vegetales en cada tipo de mortero influya en la estructura de éste. Por el contrario el empleo del *Sascab* produce unos morteros más densos y compactos debido a la pequeña granulometría que posee.

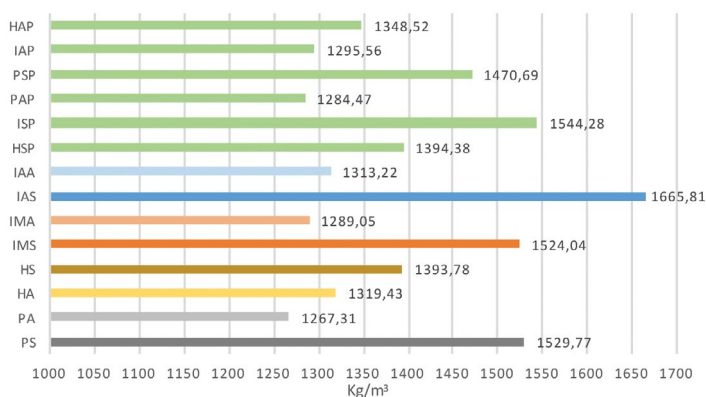


Gráfico 5.43 Promedio de densidad aparente de cada grupo de mortero y sus probetas patrón en Kg/ $m^3$ .

Tabla 5.7 Volumen ( $m^3$ ) y densidad aparente en seco ( $Kg/m^3$ ) de cada tipo de mortero elaborado.

PROBETA	$V_s$ $m^3$	$D_{ap}$ $Kg/m^3$
PSR2	2.803E-05	1401.51
PSH2	2.705E-05	1432.76
PSP2	2.918E-05	1475.06
PSH5	2.700E-05	1456.90
PSR5	2.816E-05	1590.00
PSP5	2.554E-05	1822.37
PAH2	2.892E-05	1278.09
PAP2	2.151E-05	1223.24
PAR2	2.007E-05	1256.82
PAH5	3.289E-05	1267.43
PAP5	2.719E-05	1286.33
PAR5	2.868E-05	1291.94
HAP2	2.675E-05	1339.30
HAH2	2.788E-05	1272.74
HAR2	2.423E-05	1259.90
HAP5	2.787E-05	1371.53
HAH5	2.656E-05	1344.38
HAR5	2.824E-05	1328.74
HSP2	2.355E-05	1447.49
HSH2	2.908E-05	1403.79
HSR2	2.521E-05	1322.72
HSH5	1.993E-05	1357.50
HSR5	2.799E-05	1449.96
HSP5	2.444E-05	1381.21
IMSR2	3.617E-05	1421.16
IMSP2	3.398E-05	1555.99
IMSH2	3.129E-05	1507.77
IMSR5	3.006E-05	1567.88
IMSP5	3.472E-05	1571.04
IMSH5	3.212E-05	1520.43
IMAH2	2.714E-05	1402.21
IMAP2	2.969E-05	1312.26
IMAR2	3.070E-05	1373.92
IMAR5	2.426E-05	1357.27
IMAP5	2.683E-05	1250.31
IMAH5	2.193E-05	1038.35
IASR2	1.930E-05	2288.10
IASP2	3.376E-05	1528.82
IASH2	2.266E-05	1481.47
IASR5	3.156E-05	1591.80
IASP5	3.480E-05	1561.39
IASH5	3.193E-05	1543.27
IAAH2	2.761E-05	1351.13
IAAP2	2.402E-05	1327.97
IAAR2	2.373E-05	1316.82
IAAH5	2.876E-05	1289.03
IAAR5	2.691E-05	1285.61
IAAP5	2.631E-05	1308.77
HSP	2.808E-05	1394.38
ISP	3.697E-05	1544.28
PAP	2.201E-05	1284.47
PSP	2.964E-05	1470.69
IAP	2.314E-05	1295.56
HAP	2.676E-05	1348.52

### 5.2.6 Discusión y conclusiones de los resultados de los ensayos de caracterización física

De los resultados de los ensayos de caracterización física realizados en cada grupo de morteros se puede concluir que:

- o El índice de absorción de agua de los morteros, tanto por capilaridad como a presión atmosférica, es inferior en aquellos elaborados con *Sascab*, frente a los que fueron realizados con arena del sitio. Esta norma se cumple en todos los grupos técnicos (IAS, IMS, PS, y HS) y de ello se deduce que este árido de granulometría muy fina y regular produce unos morteros compactos, con menor porosidad; por lo que el acceso del agua y la circulación de ésta a través de la red porosa interna del material se ve dificultado.
- o La arena del sitio empleada, a pesar de estar tamizada, presenta una granulometría heterogénea y más grande que la del *Sascab*, por lo que produce unos morteros con partículas irregulares, y con ello la producción de más cantidad de “huecos” o poros, que proporcionan mayor acceso del agua al interior del material.
- o La desorción de agua en los morteros sigue el mismo comportamiento y como es de esperar se produce de forma más lenta en aquellos elaborados con *Sascab* que en los que se conformaron con arena del sitio. Aunque en un principio esta rápida eliminación del contenido de agua en el mortero parece adecuada, una desorción de agua muy rápida podría provocar daños en el mortero de reintegración aplicado sobre el soporte pétreo. Además hay que tener en cuenta que los resultados de este ensayo se obtienen en unas condiciones climáticas de  $20\pm 5^{\circ}\text{C}$  y  $60\pm 5\%\text{HR}$ ; con lo que el índice de desorción se vería incrementado con las condiciones extremas del clima tropical. Por el contrario los morteros realizados con *Sascab* presentan una transición más suave entre la absorción y la desorción, que deriva en un comportamiento más inocuo para el material.
- o Todos los grupos técnicos realizados presentan buena permeabilidad, siendo más elevada en los grupos PS e IMA, que experimentan una variación de la masa mayor durante el ensayo, mientras que los grupos PA y HS-HA presentan los valores de variación de la masa acumulada más bajos del ensayo. El resto de grupos (IMS, IAA, IAS) se mantienen en valores intermedios similares para todos ellos. Al igual que en los anteriores ensayos hídricos comentados, no se encuentran patrones de comportamiento para un determinado aditivo vegetal en ningún grupo técnico, independientemente de su porcentaje de agregación; por lo que se puede concluir que éstos no interrumpen el comportamiento normal del agua (absorción- desorción y permeabilidad).



- o Sin embargo los aditivos vegetales sí intervienen en el proceso de carbonatación de los morteros incrementando su resistencia. Los morteros de los grupos técnicos IAA, IAS, PA y PS, (cal apagada con agua y aditivos vegetales añadidos posteriormente en el agua del mortero), presentan menos resistencia a la carbonatación que aquellos grupos técnicos con mayor aporte de aditivo, al apagar la cal directamente con el agua de la maceración (IMS, IMA, HS y HA). Este hecho se constata al comparar con los morteros patrones de cada grupo técnico, que muestran, en la mayoría de los casos, una carbonatación casi completa. De igual modo, dentro de cada grupo técnico se observa una diferencia significativa entre los morteros elaborados con 0,5% de aditivo, que muestran un proceso más avanzado de carbonatación, frente a los morteros con un 2% de aditivo, que se encuentran carbonatados en menor grado. Otro factor que influye en el incremento de la resistencia a la carbonatación es el árido empleado, ya que se observa una clara diferencia entre los morteros elaborados con arena, más carbonatados, y menos los realizados con *Sascab*.
  
- o Los morteros compuestos con arena del sitio (PA, HA, IMA, IAA) presentan una densidad aparente menor que los realizados con *Sascab* como carga, lo cual ayuda a entender el comportamiento hídrico diferenciado entre unos y otros. Esta menor densidad es sinónimo de una estructura con mayores espacios abiertos, accesibles al agua. Aunque en los ensayos hídricos no se haya verificado una influencia directa, el empleo del aditivo vegetal extraído del Pixoy en los morteros de los grupos PA, HS y HA produce un incremento de la densidad aparente, posiblemente al envolver las partículas de cal, disminuyendo la cantidad de poros.



## 5.3 Ensayos de caracterización mecánica

Estos ensayos se realizan con el objetivo de determinar la resistencia mecánica del mortero endurecido frente a diversas fuerzas de tracción o compresión, permitiendo realizar un estudio comparativo y seleccionar aquellos morteros que reúnan las propiedades adecuadas para el propósito de estudio.

### 5.3.1 Determinación de la resistencia al desgaste por rozamiento

Para evaluar la dureza superficial de las distintas probetas de mortero, se ha empleado un medidor lineal del desgaste por abrasión Taber® 5750 de la casa *Neurtek Instruments* (Fig.5.24). Este instrumento permite verificar la resistencia o la susceptibilidad relativa de la superficie de un material frente a daños físicos como el desgaste o la abrasión, simulando las condiciones reales de erosión. El medidor lineal emplea para este ensayo gomas abrasivas *Wearaser®*, colocadas en el conjunto de amarre situado en un eje estriado, que queda apoyado sobre la probeta de forma perpendicular a ésta. Este eje realiza movimientos lineales (carrera), que pueden ser ajustados dependiendo de las necesidades del ensayo, seleccionando la longitud de la carrera, la velocidad y los ciclos de repetición deseados.



Figura 5.24 Abrasímetro lineal Taber© empleado para el ensayo.

### 5.3.1.1 Metodología de ensayo

Para la realización de este ensayo de abrasión se acondicionó el instrumento en función de unas pruebas previas para familiarizarse con la acción de los abrasivos sobre el material. Dado que la superficie expuesta de la probeta presenta generalmente una mayor dureza con respecto al anverso del material, se decidió ensayar ambas caras de la probeta para testar la diferencia. Se seleccionó un abrasivo elástico suave (CS10) y uno vitrificado fino (H10) para el anverso de las probetas; y un abrasivo elástico muy suave (CS8) para el reverso de éstas, ligeramente menos resistente. Los ciclos seleccionados fueron 5-10 para el anverso y 2-5-10 para el reverso (Fig.5.25). Los ciclos se realizaron con una velocidad de 15 ciclos por minuto, y con una longitud de carrera de 12,7 mm. Se empleó una probeta de cada tipo de mortero de dimensiones 4x4x2 cm. Las condiciones de curado son diversas ya que cada grupo técnico fue elaborado en un año distinto (2011-2016). Aun así el conjunto de probetas sometidas a ensayo fue dispuesto en rejillas y curado durante cinco meses, en unas condiciones de entre 20-23°C y entre 50-55% HR.

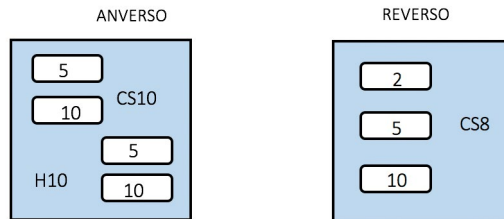


Figura 5.25 Esquema de la distribución de las carreras efectuadas sobre ambas superficies de las probetas, con indicación de los ciclos realizados y los abrasivos empleados.

Para visualizar mejor el desgaste producido en la superficie de la probeta, se aplicó un tinte de (verde en el anverso; azul en el reverso) que permitió la medición de la abrasión, al eliminar parte de esta superficie tintada y dejar una marca blanca. El nivel de abrasión fue determinado mediante el método visual; prueba subjetiva que requiere el examen de la muestra para describir su desgaste de forma exhaustiva, describiendo las medidas y el grado de la marca producida (Fig.5.26). Para la evaluación posterior del ensayo se fijaron dos niveles de desgaste, superficial y profundo, con dos y tres grados de deterioro respectivamente:

- Desgaste superficial 1°: Superficie visiblemente no alterada, no se puede medir la erosión (-).
- Desgaste superficial 2°: Superficie ligeramente marcada.
- Desgaste profundo 1°: Pérdida de la superficie tintada y erosión en el sustrato de hasta de 1mm.
- Desgaste profundo 2°: Erosión en el sustrato de más de 1mm de profundidad.
- Desgaste profundo 3°: Erosión en el sustrato de más de 3mm o hasta rotura de la probeta.

## 5.3.1.2 Resultados del ensayo

Las superficies de las probetas fueron inspeccionadas y valoradas según el sistema descrito, obteniéndose los resultados detallados en la tabla 5.8.

Tabla 5.8 Evaluación del desgaste por rozamiento de cada una de las probetas de mortero. El guion en la celda de dimensión indica que no ha sido posible la medición del desgaste por ser imperceptible.

PROBETA		Wearaser®	Nº ciclos	Medida (cm)		Nivel de erosión				
Sigla	Zona			Largo	Ancho	Superficial		Profundo		
						°1	°2	°1	°2	°3
IASR5	ANV.	CS10	5	1,2	0,5		X			
			10	1,2	0,5		X			
		H10	5	2,3	1,4			X		
			10	2,3	1,4				X	
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	-	-	X				
IASR2	ANV.	CS10	5	1,8	0,3	X				
			10	1,8	0,3	X				
		H10	5	1	0,4		X			
			10	1,3	0,4			X		
	REV.	CS8	2	1,1	0,5	X				
			5	1,1	0,5	X				
IASP5	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	-	-	X				
		H10	5	1,2	0,3		X			
			10	1,2	0,4		X			
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	-	-	X				
IASP2	ANV.	CS10	5	2,1	0,6		X			
			10	2,1	0,6		X			
		H10	5	1,2	0,4			X		
			10	1,4	0,8				X	
	REV.	CS8	2	1,3	0,5	X				
			5	1,3	0,5	X				
IASH5	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	1,6	0,3	X				
		H10	5	1,2	0,4		X			
			10	1,4	0,7				X	
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	-	-	X				
IASH2	ANV.	CS10	5	2	-	X				
			10	2	0,5		X			
		H10	5	1,4	0,3			X		
			10	1,4	0,6				X	
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	1,8	0,5			X		
ISP	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	1,7	0,6		X			
		H10	5	1,4	0,4		X			
			10	1,3	0,4			X		
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	-	-	X				
			10	1,4	0,8				X	

PROBETA		Wearaser <sup>®</sup>	Nº ciclos	Medida (cm)		Nivel de erosión				
Sigla	Zona			Largo	Ancho	Superficial		Profundo		
						°1	°2	°1	°2	°3
PSR5	ANV.	CS10	5	1,2	0,5		X			
			10	1,6	0,6		X			
		H10	5	1,1	0,6				X	
			10	1,3	0,6					X
	REV.	CS8	2	1,3	0,6	X				
			5	1,3	0,6	X				
10			1,5	0,7	X					
PSR2	ANV.	CS10	5	-	-	x				
			10	-	-	x				
		H10	5	0,9	0,4		x			
			10	1,3	0,5		x			
	REV.	CS8	2	1,1	0,3	x				
			5	1,1	0,3	x				
10			1,3	0,3	x					
PSH5	ANV.	CS10	5	-	-	x				
			10	1,5	0,4	x				
		H10	5	2,7	0,5				x	
			10	2,4	0,6				x	
	REV.	CS8	2	-	-	x				
			5	-	-	x				
10			-	-	x					
PSH2	ANV.	CS10	5	2	0,3	X				
			10	2,2	0,5	X				
		H10	5	1,5	0,6				X	
			10	1,5	0,6				X	
	REV.	CS8	2	1,1	0,7	X				
			5	1,1	0,7	X				
10			1,1	0,7	X					
PSP5	ANV.	CS10	5	1,5	0,4		X			
			10	1,9	0,5		X			
		H10	5	1,5	0,5			X		
			10	1,3	0,5			X		
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	-	-	X				
10			-	-	X					
PSP2	ANV.	CS10	5	0,5	0,4		X			
			10	0,8	0,4		X			
		H10	5	1,1	0,5		X			
			10	1,4	0,5			X		
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	-	-	X				
10			-	-	X					
PSP	ANV.	CS10	5	1	0,4	X		X		
			10	1,2	0,4		X			
		H10	5	1,3	0,6				X	
			10	1,3	0,6				X	
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	1,5	0,8					X
10			1,5	0,8					X	
IAARS	ANV.	CS10	5	0,9	0,3	X				
			10	1,2	0,4	X				
		H10	5	1,2	0,4			X		
			10	1,3	0,6				X	
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	-	-	X				
10			-	-	X					

PROBETA		Wearaser®	Nº ciclos	Medida (cm)		Nivel de erosión				
Sigla	Zona			Largo	Ancho	Superficial		Profundo		
						°1	°2	°1	°2	°3
IAAR2	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	-	-	X				
		H10	5	1,2	0,4		X			
	10		1,2	0,5			X			
	REV.	CS8	2	1,4	0,7	X				
			5	1,4	0,7	X				
10			1,4	0,7		X				
IAAH5	ANV.	CS10	5	1,0	0,4		X			
			10	1,2	0,5		X			
		H10	5	1,3	0,5				X	
	10		1,2	0,6				X		
	REV.	CS8	2	1,4	0,6	X				
			5	1,4	0,6		X			
10			1,4	0,6		X				
IAAH2	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	-	-	X				
		H10	5	1,4	0,6				X	
	10		1,6	0,6					X	
	REV.	CS8	2	1,4	0,6	X				
			5	1,4	0,6	X				
10			1,4	0,6	X					
IAAP5	ANV.	CS10	5	0,8	0,5		X			
			10	0,8	0,5		X			
		H10	5	0,9	0,6			X		
	10		1,1	0,6				X		
	REV.	CS8	2	1,1	0,5	X				
			5	1,3	0,6	X				
10			1,3	0,6	X					
IAAP2	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	-	-	X				
		H10	5	1,2	0,5		X			
	10		1,2	0,6			X			
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	-	-	X				
10			-	-	X					
IMAR2	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	-	-	X				
		H10	5	1,0	0,5			X		
	10		1,3	0,5				X		
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	-	-	X				
10			-	-	X					
IMAR5	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	0,8	0,5	X				
		H10	5	1,3	0,3		X			
	10		1,3	0,5		X				
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	-	-	X				
10			-	-	X					
IMAH5	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	-	-	X				
		H10	5	1,0	0,5		X			
	10		1,3	0,6				X		
	REV.	CS8	2	1,2	0,7	X				
			5	1,2	0,7	X				
10			1,2	0,7		X				

PROBETA		Wearaser <sup>®</sup>	Nº ciclos	Medida (cm)		Nivel de erosión				
Sigla	Zona			Largo	Ancho	Superficial		Profundo		
						°1	°2	°1	°2	°3
IMAH2	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	-	-	X				
		REV.H10	5	1,0	0,3		X			
			10	1,3	0,5			X		
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	-	-	X				
10			-	-	X					
IMAP5	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	0,9	0,5		X			
		H10	5	1,1	0,5		X			
			10	1,3	0,5			X		
	REV.	CS8	2	1,4	0,6	X				
			5	1,4	0,6		X			
10			1,4	0,6		X				
IMAP2	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	-	-	X				
		H10	5	1,1	0,4		X			
			10	1,1	0,5			X		
	REV.	CS8	2	1,5	0,5		X			
			5	1,5	0,6		X			
10			1,5	0,6		X				
IMSH5	ANV.	CS10	5	1,9	0,5		X			
			10	1,9	0,5		X			
		H10	5	1,4	0,6				X	
			10	1,4	0,6R					X
	REV.	CS8	2	1,3	0,7	X				
			5	1,3	0,7	X				
10			1,5	0,5				X		
IMSH2	ANV.	CS10	5	1,3	0,4		X			
			10	1,5	0,4		X			
		H10	5	0,8	0,5				X	
			10	1,4	0,5				X	
	REV.	CS8	2	1,5	0,6	X				
			5	1,5	0,6	X				
10			1,6	0,6	X					
IMSP5	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	1,7	0,4		X			
		H10	5	1,3	0,5				X	
			10	1,3	0,5				X	
	REV.	CS8	2	1,5	0,7	X				
			5	1,5	0,7		X			
10			1,5	0,7		X				
IMSP2	ANV.	CS10	5	1,8	0,4		X			
			10	1,8	0,5		X			
		H10	5	1,1	0,2		X			
			10	1,2	0,3		X			
	REV.	CS8	2	1,3	0,6	X				
			5	1,3	0,6	X				
10			1,3	0,6	X					
IMSR5	ANV.	CS10	5	1,6	0,2	X				
			10	1,8	0,4		X			
		H10	5	1,1	0,3		X			
			10	1,3	0,4			X		
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	-	-	X				
10			-	-	X					

PROBETA		Wearaser®	Nº ciclos	Medida (cm)		Nivel de erosión				
Sigla	Zona			Largo	Ancho	Superficial		Profundo		
						°1	°2	°1	°2	°3
IMSR2	ANV.	CS10	5	1,5	0,6		X			
			10	2,0	0,6		X			
		H10	5	1,2	0,6				X	
			10	1,4	0,6				X	
	REV.	CS8	2	1,6	0,5	X				
			5	1,6	0,5	X				
			10	1,6	0,5	X				
PAH5	ANV.	CS10	5	1,0	0,5	X				
			10	1,0	0,5		X			
		H10	5	1,1	0,5			X		
			10	1,2	0,6			X		
	REV.	CS8	2	1,2	0,7	X				
			5	1,2	0,7	X				
			10	1,2	0,7	X				
PAH2	ANV.	CS10	5	1,2	0,2		X			
			10	1,1	0,4		X			
		H10	5	1,3	0,5			X		
			10	1,3	0,5			X		
	REV.	CS8	2	-	-				X	
			5	-	-				X	
			10	-	-			X		
PAR5	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	1,0	2,0		X			
		H10	5	1,2	0,5			X		
			10	1,2	0,5				X	
	REV.	CS8	2	-	-					X
			5	-	-					X
			10	-	-				X	
PAR2	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	1,5	0,5	X				
		H10	5	1,0	0,6		X			
			10	1,4	0,6		X			
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	-	-	X				
			10	-	-	X				
PAP5	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	1,4	0,4		X			
		H10	5	1,3	0,6				X	
			10	-	-					X
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	-	-	X				
			10	-	-	X				
PAP2	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	1,1	0,6		X			
		H10	5	1,3	0,6			X		
			10	-	-					X
	REV.	CS8	2	1,3	0,7	X				
			5	1,3	0,7	X				
			10	1,3	0,7	X				
HSR2	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	-	-	X				
		H10	5	1,0	0,4		X			
			10	1,0	0,4		X			
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	-	-	X				
			10	-	-	X				

PROBETA		Wearaser <sup>®</sup>	Nº ciclos	Medida (cm)		Nivel de erosión				
Sigla	Zona			Largo	Ancho	Superficial		Profundo		
						°1	°2	°1	°2	°3
HSR5	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	1,7	0,4	X				
		H10	5	1,6	0,4		X			
			10	1,3	0,4		X			
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	-	-	X				
			10	-	-	X				
HSH5	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	0,7	0,5	X				
		H10	5	1,1	0,3			X		
			10	1,1	0,3			X		
	REV.	CS8	2	1,5	0,5					X
			5	1,3	0,5					X
			10	-	-				X	
HSH2	ANV.	CS10	5	0,7	0,2		X			
			10	0,7	0,2		X			
		H10	5	1,0	0,3				X	
			10	1,1	0,4				X	
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	-	-	X				
			10	-	-	X				
HSP5	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	-	-	X				
		H10	5	1,0	0,3		X			
			10	1,0	0,5		X			
	REV.	CS8	2	1,5	0,6					X
			5	1,2	0,6					X
			10	-	-				X	
HSP2	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	-	-	X				
		H10	5	1,0	0,3				X	
			10	1,0	0,4				X	
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	-	-	X				
			10	-	-	X				
HAR5	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	-	-	X				
		H10	5	1,2	0,5				X	
			10	1,2	0,5				X	
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	-	-	X				
			10	-	-	X				
HAR2	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	-	-	X				
		H10	5	0,5	0,6				X	
			10	0,9	0,6				X	
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	-	-	X				
			10	-	-	X				
HAH5	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	-	-	X				
		H10	5	1,2	0,4		X			
			10	1,2	0,5		X			
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	0,8	0,7	X				
			10	0,9	0,6					X



PROBETA		Wearaser®	Nº ciclos	Medida (cm)		Nivel de erosión				
Sigla	Zona			Largo	Ancho	Superficial		Profundo		
						°1	°2	°1	°2	°3
HAH2	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	-	-	X				
		H10	5	1,1	0,4		X			
			10	0,7	0,4		X			
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	0,9	0,5	X				
		10	0,9	0,5					X	
HAP5	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	-	-	X				
		H10	5	0,5	0,4		X			
			10	0,7	0,4		X			
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	0,9	0,5		X			
		10	0,9	0,5		X				
HAP2	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	-	-	X				
		H10	5	1,1	0,3		X			
			10	1	0,3		X			
	REV.	CS8	2	0,4	0,5	X				
			5	1,6	0,6					X
		10	1,4	0,6					X	
IAP	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	-	-	X				
		H10	5	1,3	0,6			X		
			10	1,3	0,6				X	
	REV.	CS8	2	1,2	0,6	X				
			5	1,2	0,6	X				
		10	1,2	0,6	X					
HSP	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	-	-	X				
		H10	5	1,2	0,6			X		
			10	1,8	0,6				X	
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	1,3	0,6		X			
		10	1,3	0,6		X				
PAP	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	-	-	X				
		H10	5	1,1	0,5		X			
			10	1,3	0,5		X			
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	-	-	X				
		10	-	-	X					
HAP	ANV.	CS10	5	-	-	X				
			10	-	-	X				
		H10	5	1,2	0,5		X			
			10	1,2	0,5		X			
	REV.	CS8	2	-	-	X				
			5	1,2	0,6		X			
		10	1,2	0,6		X				



Figura 5.26 Nivel de desgaste superficial 1° y 2° (izquierda); profundo 1° y 2° (central) y profundo 2° y 3° (derecha).

Haciendo un baremo de los resultados obtenidos, se observa objetivamente que la superficie que mayor resistencia ofrece al desgaste por abrasión es siempre el anverso, probablemente por la presencia de una capa de carbonatación de mayor espesor, formada desde el momento del moldeado. En todos los grupos técnicos se hallan probetas que solo han sufrido desgaste a nivel superficial, en 1° y 2°; siendo las más abundantes las del grupo H (HA y HS, realizados con cal apagada por mezclado en caliente con *Sascab* y arena local). En el otro extremo, las probetas que han sufrido los mayores daños por abrasión corresponden al grupo PA y PS, realizado con la cal apagada por pudrición; que presentan marcas de grado 3 sobretodo en el reverso de la probeta y en el anverso ensayado con el abrasivo H10. Las probetas de los grupos IMS, IMA, IAA e IAS, presentan una resistencia media pero más regular al desgaste, con una media de marcas superficiales de 1 y 2 grados o profundas de 1 y 2 grados, sin llegar apenas a la máxima erosión establecida. Este comportamiento podría deberse a la mayor regularidad granulométrica de estos grupos de probetas, que conforman una superficie lisa y homogénea en conjunto, capaz de ofrecer buena resistencia. La irregularidad granulométrica de los grupos PA, PS, HS y HA, puede incrementar el desgaste puntual por abrasión debido a que las partículas más grandes son arrastradas por el instrumento abrasivo.

### 5.3.2 Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros endurecidos

Este ensayo tiene como objeto definir un método de ensayo que determine la resistencia a la adhesión, o resistencia de unión entre un mortero y un soporte. Con ello se pretende especificar la adhesividad que presenta cada grupo técnico de mortero, realizado con los tres tipos de exudados vegetales descritos anteriormente. Así mismo comparar con sus respectivas probetas patrón, valorando la influencia de estos aditivos como potenciadores de la adhesión.

La resistencia a la adhesión se define como la tracción máxima al arrancamiento por carga directa perpendicular del mortero aplicado en un soporte. Por tanto es la relación entre la carga de rotura y el área de la superficie de ensayo, expresado mediante la siguiente fórmula:

$$f_u = \frac{F_u}{A}$$

Donde  $f_u$  es la resistencia a la adhesión (resistencia de unión) en  $N/mm^2$ ;  $F_u$  es la carga de rotura en  $N$  y  $A$  es el área de la superficie de ensayo de la probeta cilíndrica en  $mm^2$ . Además, para describir mejor el resultado del ensayo, el tipo de rotura que se produce se clasifica de la siguiente forma (Tabla 5.9):

Tabla 5.9 Tipos de rotura

TIPO ROTURA	DESCRIPCIÓN
A Rotura adhesiva	Rotura en la interfase entre el mortero y el soporte. El valor de ensayo es igual a la resistencia a la adhesión (resistencia de unión).
B Rotura cohesiva	Rotura en el mortero. La resistencia a la adhesión es (resistencia de unión) es mayor que el valor del ensayo.
C Rotura cohesiva	Rotura en el soporte. La resistencia a la adhesión (resistencia de unión) es mayor que el valor del ensayo.

### 5.3.2.1 Metodología de ensayo

El ensayo se ha realizado según la normativa española UNE-EN 1015-12 (CEN®) *Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros para revoco y enlucido endurecidos aplicados sobre soportes*. El ensayo se ha realizado mediante un medidor de adherencia electrónico KN-10 de la casa NEURTEK Instruments®, con un rango de medición de 5 a 1000kgf (Fig.5.27). La carga de tracción se aplica sobre una pastilla de tracción definida, pegada a la superficie de ensayo del mortero, en este caso sufrideras de  $\varnothing 20$  mm adheridas mediante resina epoxídica Araldite® de rápido secado.

Los morteros destinados a este ensayo fueron preparados en el laboratorio de Flores, Guatemala, durante las campañas de trabajo de 2013 y 2016. Se guardaron en bolsas herméticamente selladas y se trasladaron a España. La aplicación sobre el soporte de ensayo tuvo lugar entre los dos y cuatro días siguientes a su elaboración. El soporte de ensayo seleccionado fue una placa de escayola reforzada y se prepararon dos probetas de cada tipo de mortero. En la superficie del soporte se realizaron incisiones para mejorar el agarre y se humedeció antes de aplicar las muestras de mortero fresco.

Dada de diferencia de tiempo en la elaboración, la curación de éstas antes de realizar la prueba de tracción, contaba con tres años para las probetas realizadas en 2013 y de seis meses para las realizadas en 2016.



Fig. 5.27 Proceso de tracción directa sobre las probetas de mortero y total de probetas sometidas a ensayo.

### 5.3.2.2 Resultados del ensayo

Los resultados del ensayo muestran una resistencia a la adhesión baja, produciéndose la separación del mortero con una tracción de entre  $>5$  y  $10$  Kgf. ( $0,16-0,31$  N/mm<sup>2</sup>). La gran mayoría de roturas son adhesivas tipo A, si bien se evidencian diferencias significativas para cada grupo técnico (Tabla 5.10).

Las probetas de mortero IMA (Cal apagada por inmersión en agua de maceración de las tres cortezas bajo estudio (0,5% y 2%), mas arena del sitio), presentan roturas adhesivas A y cohesivas B, produciéndose la rotura B en el estuco, por lo que la resistencia a la adhesión es mayor que la cohesión del material que compone la probeta, produciéndose la rotura por la zona más débil. De este grupo, las probetas realizadas con el exudado de Ramón al 2% (IMAR2) y con al Habín 2% (IMAH2), han necesitado una fuerza de tracción superior (10Kgf.) para producirse la rotura (Tipo A), por lo que se podría deducir que estos aditivos mejoran la consistencia interna y el poder de adhesión ( $0,31$  N/mm<sup>2</sup>).

El grupo de morteros IMS (Cal apagada por inmersión en agua de maceración de las tres cortezas bajo estudio (0,5% y 2%), y *Sascab*) presenta mayormente roturas adhesivas tipo A y en menor medida cohesivas tipo B y C. La mayoría de roturas A evidencia la baja resistencia a la adhesión del mortero, igual al valor del ensayo ( $>0,16$ N/mm<sup>2</sup>) y una buena cohesión interna del mortero.

Los mismos resultados se han obtenido en los grupos IAA (Cal apagada por inmersión en agua y arena del sitio) e IAS (Cal apagada por inmersión en agua, mas *Sascab*), que presentan los mismos valores de ensayo, con una rotura predominantemente adhesiva tipo A, reflejo de la baja resistencia a la adhesión ( $>0,16$ N/mm<sup>2</sup>), con buena cohesión interna del mortero.

Los grupos PA (cal apagada por pudrición más arena del sitio) y PS (Cal apagada por pudrición más *Sascab*) han obtenido los mismos valores bajos de resistencia ( $>0,16<0,31\text{N/mm}^2$ ), presentando roturas cohesivas tipo B mayoritariamente, indicando que la resistencia a la adhesión es mayor que la cohesión interna del mortero, que en este caso es significativamente más débil que en los anteriores grupos. El pequeño aporte de exudados vegetales (Pixoy, Ramón y Habín 0,5% y 2%) en el agua del amasado no parece influir de ningún modo ni en la mejora de la adhesión ni de la cohesión interna del material.

El grupo HA (Cal apagada por mezclado en caliente con arena del sitio) presenta de nuevo una adherencia baja ( $>0,16<0,31\text{N/mm}^2$ ), con roturas adhesivas de tipo A; mientras que el grupo HS (Cal apagada por mezclado en caliente con *Sascab*) presenta mayoría de roturas cohesivas tipo B, indicando menor cohesión interna que su mismo grupo elaborado con arena del sitio. La probeta HSH2 (rotura B) ha requerido de mayor fuerza de tracción para la fractura (10 Kgf.), coincidiendo con la probeta (IMAH2), que podría indicar un aumento de la dureza y adhesión del mortero, al añadir el exudado de Habín 2%.

Tabla 5.10 Resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la adhesión por tracción directa.

PROBETA	Fu (Kgf.)	N/mm <sup>2</sup>	Tipo rotura
IMAR5	>5<10	>0,16<0,31	B
	>5<10	>0,16<0,31	B
IMAR2	>5<10	>0,16<0,31	A
	10	0,31	A
IMAH5	>5<10	>0,16<0,31	B
	>5<10	>0,16<0,31	B
IMAH2	>5<10	>0,16<0,31	A
	10	0,31	A
IMAP5	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
IMAP2	>5<10	>0,16<0,31	B
	>5<10	>0,16<0,31	B
IMSR5	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
IMSR2	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
IMSH5	>5<10	>0,16<0,31	B
	>5<10	>0,16<0,31	B
IMSH2	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
IMSP5	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	C
IMSP2	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
IAAR5	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
IAAR2	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
IAAH5	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
IAAH2	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
IAAP5	>5<10	>0,16<0,31	B
	>5<10	>0,16<0,31	B

PROBETA	Fu (Kgf.)	N/mm <sup>2</sup>	Tipo rotura
IAAP2	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
IASR5	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
IASR2	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
IASH5	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
IASH2	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
IASP5	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
IASP2	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
PAR5	>5<10	>0,16<0,31	B
	>5<10	>0,16<0,31	B
PAR2	>5<10	>0,16<0,31	B
	>5<10	>0,16<0,31	B
PAH5	>5<10	>0,16<0,31	B
	>5<10	>0,16<0,31	B
PAH2	>5<10	>0,16<0,31	B
	>5<10	>0,16<0,31	B
PAP5	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
PAP2	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	B
PSR5	>5<10	>0,16<0,31	B
	>5<10	>0,16<0,31	B
PSR2	>5<10	>0,16<0,31	B
	>5<10	>0,16<0,31	B
PSH5	>5<10	>0,16<0,31	B
	>5<10	>0,16<0,31	B
PSH2	>5<10	>0,16<0,31	B
	>5<10	>0,16<0,31	B
PSP5	>5<10	>0,16<0,31	B
	>5<10	>0,16<0,31	B
PSP2	>5<10	>0,16<0,31	B
	>5<10	>0,16<0,31	A
HAR5	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
HAR2	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
HAH5	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
HAH2	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
HAP5	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
HAP2	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
HSR5	>5<10	>0,16<0,31	B
	>5<10	>0,16<0,31	B
HSR2	>5<10	>0,16<0,31	B
	>5<10	>0,16<0,31	B

PROBETA	Fu (Kgf.)	N/mm <sup>2</sup>	Tipo rotura
HSH5	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
HSH2	10	0,31	B
	>5<10	>0,16<0,31	B
HSP5	>5<10	>0,16<0,31	B
	>5<10	>0,16<0,31	B
HSP2	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
PAP	>5<10	>0,16<0,31	B
	>5<10	>0,16<0,31	B
ISP	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
IAP	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A
HSP	>5<10	>0,16<0,31	B
	>5<10	>0,16<0,31	B
PSP	>5<10	>0,16<0,31	B
	>5<10	>0,16<0,31	B
HAP	>5<10	>0,16<0,31	A
	>5<10	>0,16<0,31	A

### 5.3.3 Determinación de la resistencia a compresión<sup>4</sup>

Este ensayo se ha realizado con el objetivo de determinar el esfuerzo máximo que puede soportar cada tipo de mortero a una carga, sin romperse. Esta resistencia está relacionada con la densidad de cada mortero y con la resistencia a la carbonatación que presenten. Si bien los morteros destinados a la reintegración mural no suelen estar sometidos a cargas de compresión; tanto en La Blanca como en otros sitios mayas, se localizan también superficies horizontales estucadas, como banquetas o pisos, que una vez restaurados podrían estar sujetos a estas fuerzas compresivas por la acción antrópica. Por ello es conveniente examinar dicha resistencia, descartando aquellos morteros de reintegración que presenten valores muy bajos. La carga se aplica sin aceleraciones y se aumenta progresivamente (50 N/s – 500 N/s), para que la rotura se produzca entre los 30s y los 90s. La resistencia se calcula dividiendo la carga máxima soportada por la probeta por su sección transversal.

#### 5.3.3.1 Metodología de ensayo

El ensayo se ha realizado según la normativa española UNE-EN 1015:1999 (CEN<sup>®</sup>) *Determinación de la resistencia a flexión y compresión del mortero endurecido*. En este caso, la primera parte del ensayo (Flexión) no se ha podido realizar debido al pequeño tamaño de las probetas y a la imposibilidad de fabricar más. Asimismo se ha podido emplear únicamente una probeta de cada tipo de mortero de dimensiones 4x4x2 cm. Las probetas han sido lijadas superficialmente para nivelar ambas partes, dejando las dos superficies lo más paralelas posible, para evitar alteraciones.

<sup>4</sup> El ensayo de Resistencia a la compresión se ha realizado en el Laboratorio de Construcción de la E.T.S de Arquitectura de la Universitat Politècnica de València.



Fig.5.28 Prensa empleada en el ensayo de resistencia a compresión.

Se ha empleado una prensa universal de ensayos Ibertest®, acoplado el adaptador para el ensayo de compresión; el cual ha sido modificado, añadiendo una placa auxiliar de acero de 4x4x2 cm para obtener la medida estándar de 4x4x4 cm necesaria para este ensayo (Fig.5.28).

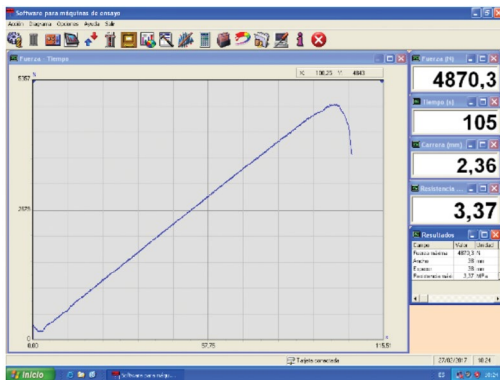


Fig. 5.29 Imagen del gráfico fuerza-tiempo donde se indica la fuerza máxima soportada (N), el tiempo transcurrido hasta el fallo (s), carrera (mm) y resistencia (Mpa). Fig. 5.30 Roturas producidas en dos probetas del grupo HA tras el ensayo.

### 5.3.3.2 Resultados del ensayo

Los resultados del ensayo muestran unos valores de resistencia elevados de forma general en todos los grupos técnicos elaborados (Tabla 5.11).



Tabla 5.11 Resultados del ensayo de resistencias a la compresión para cada probeta ensayada.

PROBETA	CARGA MÁXIMA (N)	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (Mpa/ Nmm <sup>2</sup> ) <sup>2</sup>
IASR5	3419,5	1,99
IASR2	5685	3,64
IASH5	5302,8	3,15
IASH2	5269	3,38
IASP5	6370,6	3,70
IASP2	5337,4	3,18
IAAR5	2608	1,96
IAAR2	3680,3	2,48
IAAH5	3214,1	2,22
IAAH2	3684,2	2,39
IAAP5	3199	2,24
IAAP2	5013	3,21
IAP	3551	2,28
IMSR5	7319,7	4,36
IMSR2	5490,3	3,19
IMSH5	4837,2	2,81
IMSH2	4223,5	2,45
IMSP5	7150,3	3,96
IMSP2	5650,6	3,20
IMAR5	7437,7	5,02
IMAR2	4913,9	3,15
IMAH5	4148,1	2,95
IMAH2	6387,7	4,15
IMAP5	4373,9	3,03
IMSP2	5239,5	3,44
ISP	5121	3,12
PAR5	2872,7	1,94
PAR2	2286	1,58
PAH5	2223,2	1,45
PAH2	1585,3	1,07
PAP5	1867,5	1,33
PAP2	811,7	0,55
PAP	2346,5	1,65
PSR5	2973,9	2,06
PSR2	3635,7	2,45
PSH5	3488,5	2,35
PSH2	3665,9	2,47
PSP5	2658,2	1,75
PSP2	2483,3	1,68
PSP	3250,4	2,19
HAR5	6074,8	4,44
HAR2	3115,8	2,41
HAH5	5685,7	4,04
HAH2	4870,3	3,37
HAP5	8299,8	6,41
HAP2	5819	4,49
HAP	8676,4	6,88
HSR5	4122	2,85
HSR2	411,4	0,27
HSH5	8094,5	5,53
HSH2	1668,5	1,11
HSP5	6971,2	4,65
HSP2	1061,7	0,72
HSP	3909,3	2,44

<sup>5</sup> Dado que solo se ha podido emplear una probeta por tipo de mortero, no ha sido posible determinar la desviación estándar de los resultados obtenidos.

De los grupos IA (cal apagada por inmersión en agua+ agua macerada en el amasado), el realizado con *Sascab* (IAS) es ligeramente más resistente (3.17Mpa) respecto al mismo elaborado con arena del sitio (IAA) (2.82Mpa) (Gráfico 5.44). El grupo IM (Cal apagada por inmersión en el agua de los macerados) presenta valores similares en sus dos variantes de árido, con *Sascab* (IMS) (3.32Mpa) y con arena del sitio (IMA) (3.42Mpa), siendo estos últimos ligeramente más resistentes (Gráfico 5.45). Tanto IM como IA representan un incremento de resistencia con respecto a su mortero patrón, elaborado sin aditivos orgánicos; con lo que se puede deducir que la adición de exudados vegetales, tanto en el agua de apagado, como añadida en el agua de mortero, incrementa la resistencia al producir un mortero más homogéneo y denso.

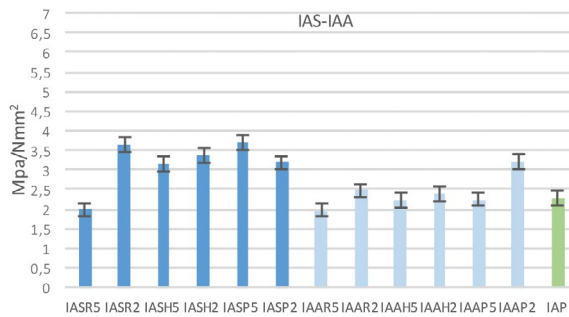


Gráfico 5.44. Resultados de la resistencia a la compresión de los grupos de mortero IAS e IAA.

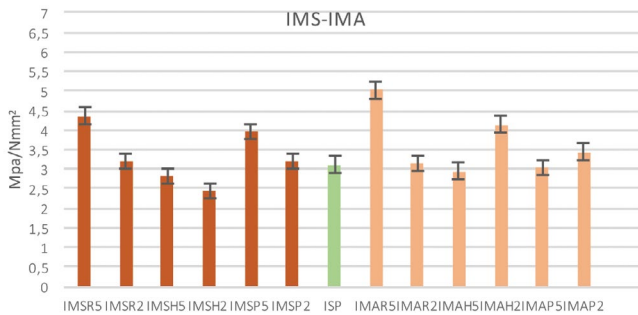


Gráfico 5.45. Resultados de la resistencia a la compresión de los grupos de mortero IMS e IMA.

Los grupos elaborados con cal apagada por pudrición (PA-PS) presentan valores de resistencia más bajos que los anteriores grupos, con un promedio de 2.34Mpa para los realizados con arena del sitio (PA) y 1.77Mpa para los realizados con *Sascab* (PS) (Gráfico 5.46).

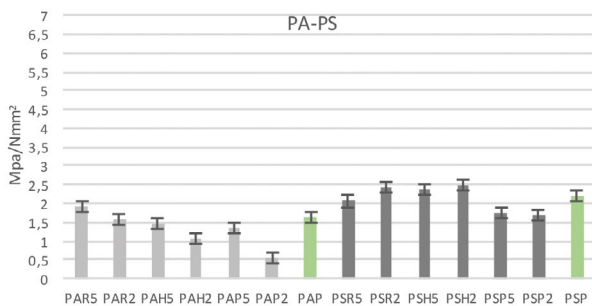


Gráfico 5.46. Resultados de la resistencia a la compresión de los grupos de mortero PA y PS.

Los morteros del grupo técnico H (cal apagada por mezclado en caliente) han revelado unos valores bastante similares, siendo un promedio de 3.05Mpa para los morteros elaborados con arena blanca del sitio (HA) y 3.33Mpa para los morteros elaborados con *Sascab* (HS) (Fig.5.30). Sin embargo, en este grupo, los morteros con el porcentaje más alto de aditivos (2%), muestran un descenso considerable de la resistencia con respecto a los que contienen 0,5% y al mortero patrón (HSP) (Gráfico 5.47).

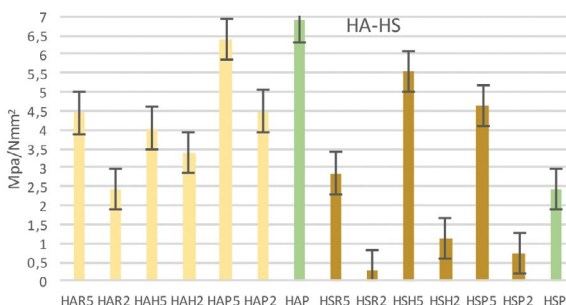


Gráfico 5.47. Resultados de la resistencia a la compresión de los grupos de mortero HA y HS.

### 5.3.4 Discusión y conclusiones de los resultados de los ensayos de caracterización mecánica

Las conclusiones que se pueden extraer de los ensayos de caracterización mecánica son:

- o Del ensayo de resistencia a la adhesión, todos los grupos técnicos presentan una adherencia baja al soporte de menos de  $0,31\text{N/mm}^2$ , pero mantienen una buena cohesión interna del mortero durante la tracción, produciéndose rotura adhesiva tipo A de forma mayoritaria en los grupos IMA, IMS, IAA, IAS y HA. Los grupos realizados con la cal apagada por pudrición (PA-PS) son mecánicamente menos resistentes que los demás grupos técnicos, obteniéndose generalmente roturas cohesivas (B), que indican un valor de cohesión interna menor que de adhesión al soporte. Del mismo modo, la superficie de estos morteros es más blanda y susceptible a la abrasión, así como a la compresión por su baja densidad. La adición de los exudados vegetales Habín y Ramón al 2%, parece incrementar la adhesividad al soporte, como se puede deducir de las probetas ensayadas IMAR2, IMAH2 y HSH2; las cuales producen una rotura adhesiva tipo A, con el requerimiento de una fuerza de tracción mayor (10kgf) que el resto de probetas.
- o Bajo el abrasímetro lineal, las probetas de mortero presentan mayor dureza superficial en el anverso, de forma generalizada, debido a la formación de una capa de carbonatación más gruesa que en las demás caras; presentando en conjunto una buena resistencia a los abrasivos de ensayo y siendo sólo cinco tipos de mortero (PAP2, PAP5, PASR5, IMSH5, IAAH2) los que han presentado erosión en profundidad grado 3, producido con el abrasivo Wereaser®H10 a los 10 ciclos. Las probetas del grupo HS presentan buena resistencia sobre todo con el aditivo de Ramón en sus dos porcentajes, ya que ambas probetas han mostrado sólo daños superficiales en el ensayo. El porcentaje más bajo de Pixoy (0,5%) en el grupo HA, junto a la probeta patrón (HAP), realizada sin aditivos, también ha resultado ser resistente en superficie al presentar solo daños superficiales. Los grupos IMA, IMS, IAA y IAS, exhiben mayoritariamente un comportamiento intermedio, con daños por abrasión clasificados entre superficial grados 1 y 2, y profundo de grado 1.
- o La resistencia a compresión de los morteros es mayor en aquellos elaborados con arena del sitio, en los grupos realizados con cal apagada con las diversas maceraciones (IMA-HA). En los grupos donde se ha apagado la cal con agua primero, y se ha adicionado con el agua de las maceraciones después, las probetas realizadas con *Sascab* son más resistentes (IAS-HA). Los morteros realizados con cal apagada por pudrición presentan una resistencia bastante baja; mientras que los grupos IMA, IMS, HA y HS ofrecen resistencias muy altas para ser morteros de cal aérea. En ambos grupos, se observa que la adición de los exudados vegetales en el porcentaje mayor (2%) disminuye esta resistencia, de forma más acusada en los morteros elaborados con *Sascab*. Con lo que se puede deducir que la adición de los exudados propicia una mayor resistencia a la compresión al producir una distribución uniforme de los componentes, si bien una adición en exceso produce la disminución de ésta al interferir en la unión de las partículas que lo componen. Prueba de ello es la probeta patrón HAP, sin aditivos orgánicos, que ostenta el valor más alto de resistencia con un  $6,8\text{ Mpa/Nmm}^2$ .

## 5.4 Ensayos de estabilidad frente a agentes de degradación físico-química

Los siguientes ensayos pretenden definir la durabilidad que poseen los diversos morteros, determinando la capacidad que tienen de resistir a los agentes físico-químicos asociados a los factores de deterioro ambientales, y poder garantizar el funcionamiento positivo de éstos a largo plazo.

### 5.4.1 Determinación de la resistencia a la cristalización de sales

#### 5.4.1.1 Metodología de ensayo

Este ensayo realizado según la normativa española UNE-EN 12370:1999 (CEN®), pretende evaluar la resistencia a la cristalización de sales de las probetas de mortero realizadas. Aunque en principio está indicado para piedra natural de baja porosidad, se ha decidido adaptarlo al material en estudio dado que la cristalización de sales *in situ* es un grave problema que afecta tanto a los estucos originales como a los de reposición, así como al soporte pétreo. Por ello se ha considerado importante determinar la resistencia que cada grupo técnico pueda presentar según la variante compositiva, complementando a los demás ensayos de durabilidad.

Después de secar hasta masa constante, las probetas son sumergidas en una solución de sulfato sódico decahidratado al 14% durante 2 horas, a una temperatura de 20°C (Fig.5.31). Seguidamente se introducen en una estufa de aire caliente a 60°C durante 15 horas, y se dejan enfriar durante dos horas más antes de volver a introducir las en el baño de sales. Este ciclo se repite 15 veces, excepto si las probetas se rompen antes.



Fig 5.31 Baño de solución salina con las probetas. Fig 5.32 Estado de desintegración de tres probetas en el ciclo n°11.

Tras el último ciclo, las probetas se neutralizan en agua durante 24 h a  $23\pm 5^{\circ}\text{C}$ ; y se secan hasta masa constante. Los resultados se expresan como la diferencia de masa relativa  $\Delta m$  (Pérdida o ganancia de masa), con respecto a la masa seca inicial  $M_d$ , mediante la fórmula:

$$\Delta m = \frac{mf - md1}{md} \cdot 100$$

O como el número de ciclos necesarios para degradar las probetas.

#### 5.4.1.2 Resultados del ensayo

Los resultados obtenidos tras el ensayo se muestran en la siguiente tabla (Tabla 5.12). El grado de resistencia a la cristalización de sales ha resultado ser bastante similar en la mayoría de grupos técnicos experimentados, a excepción de los grupos IAA (cal viva apagada por fusión con agua + arena del sitio + agua de maceraciones) e IMA (Cal viva apagada por fusión en el agua de las maceraciones + arena del sitio), que han presentado resultados significativamente diferentes en las variedades elaboradas con mayor porcentaje de aditivo vegetal (2%), ya que han resistido a doce ciclos de ensayo. Ambos grupos están constituidos por arena blanca local y sus homólogos, realizados con *Sascab* (IAS e IMS), no presentan la misma resistencia ya que se desintegran entre los 4 y los 6 ciclos. En el grupo técnico P (PA y PS) (Realizado con cal apagada por pudrición + árido + agua de las maceraciones), encontramos resultados contradictorios ya que el grupo elaborado con *Sascab* (PS) resiste un mayor número de ciclos (entre 6 y 11)(Fig.5.32); mientras que el mismo grupo realizado con arena local (PA) se desintegra a los 4 ciclos, independientemente del tipo o proporción de aditivo orgánico añadido.

El grupo H (Cal apagada por mezclado en caliente con el agua de las distintas maceraciones) ha mostrado baja resistencia a la cristalización de sales, tanto en el grupo elaborado con *Sascab* (HS), como en el realizado con arena local (HA). Todos los morteros muestran una resistencia de en torno a los 4 ciclos, desintegrándose completamente.

De entre los grupos patrón, los correspondientes a los grupos P y H siguen el mismo comportamiento que sus análogos realizados con el agua de las maceraciones. Muestran una resistencia de unos 4 ciclos de ensayo, independientemente de la arena que lo componga y del aditivo orgánico que contenga. De los morteros realizados con cal apagada por inmersión (IAP e ISP), es el realizado con arena local (IAP) el que muestra la misma resistencia que su grupo equivalente, realizado con aditivos orgánicos (IMA-IAA).

De los resultados de este ensayo se deduce que los morteros que mayor resistencia presentan frente a un agente de deterioro de naturaleza salina, son aquellos que están compuestos por arena blanca del yacimiento, concretamente los grupos realizados por la cal apagada por inmersión, tanto en agua corriente como en el agua de las maceraciones (IAA-IMA) y con el mayor porcentaje de aditivo orgánico (2%). El hecho de que estos grupos muestren un comportamiento distinto al resto de grupos técnicos, compuestos también por arena blanca del sitio puede deberse en primer lugar por una mayor carbonatación (y dureza) de las probetas, al ser éstos los primeros grupos que fueron realizados en 2011. En segundo lugar a la variación compositiva de la arena, que aunque fue extraída del mismo lugar, puede presentar oscilaciones compositivas al recogerse con posterioridad (2016).

Con excepción de estos dos grupos altamente resistentes, el resto de grupos técnicos presentan una resistencia similar, que varía entre los 4 y los 6 ciclos de cristalización. Este resultado no es negativo si tenemos en cuenta que el ensayo realizado está indicado para piedra natural; mucho más resistente que los morteros de cal aérea.

Tabla 5.12 Datos obtenidos del ensayo de cristalización de sales. Promedios de masa inicial  $M_i$  y masa final  $M_f$  (gr) de las probetas ensayadas; número de ciclos necesarios para la rotura y porcentaje de pérdida sufrido (desviación estándar entre paréntesis).

PROBETA	$M_i$ (g)	$M_f$	Nº Ciclos (g)	% Pérdida
IASR2	12.71(1.6)	-	4 (0.0)	-100
IASR5	13.12(1.5)	-	4 (0.0)	-100
IASH5	12.70(0.4)	-	6 (2)	-100
IASH2	10.65(0.4)	-	4.67(1.1)	-100
IASP5	11(1.6)	-	4.67(1.1)	-100
IASP2	11.01(1.4)	-	5.33(2.3)	-100
IAAP5	8.40(0.4)	-	6.33(4.0)	-100
IAAP2	5.14(0.2)	-	12(0)	-100
IAAH5	8(0.7)	-	4 (0.0)	-100
IAAH2	4.86(2.8)	-	12(0.0)	-100
IAAR5	7.89(1.0)	-	4.67(1.1)	-100
IAAR2	4.49(2.48)	-	12 (0.0)	-100
IMSH5	12.77(0.4)	-	5.33(1.1)	-100
IMSH2	12.44(1.0)	-	4.67(1.1)	-100
IMSR5	11.32(0.4)	-	4 (0.0)	-100
IMSR2	6.88(1.1)	-	4 (0.0)	-100
IMSP5	12.84(2.0)	-	4 (0.0)	-100
IMSP2	13.45(0.7)	-	4 (0.0)	-100
IMAH5	7.71(0.6)	-	4 (0.0)	-100
IMAH2	6.59(0.5)	-	12 (0.0)	-100
IMAR5	7.96(0.4)	-	4 (0.0)	-100
IMAR2	7.44(0.7)	-	12 (0.0)	-100
IMAP5	8.01(1.6)	-	5.33(2.1)	-100
IMAP2	6.82(0.5)	-	12 (0.0)	-100
PSH5	10.29(0.6)	-	6 (0.0)	-100
PSH2	9.46(0.1)	-	10.33(3.4)	-100
PSR5	10.83(1.3)	-	6 (0.0)	-100
PSR2	9.72(0.3)	-	9.33(4.6)	-100
PSP5	10.94(0.3)	-	9.00(5.2)	-100
PSP2	10.42(0.5)	-	11.67(5.0)	-100
PAR5	8.96(0.2)	-	4 (0.0)	-100
PAR2	7.46(0.0)	-	4 (0.0)	-100
PAH5	8.22(0.3)	-	4 (0.0)	-100
PAH2	8.26(1.7)	-	4.67(1.1)	-100
PAP5	6.93(0.7)	-	4 (0.0)	-100
PAP2	6.71(0.5)	-	4 (0.0)	-100
HSR5	9.31(0.2)	-	4.67(1.1)	-100
HSR2	9.14(0.8)	-	4 (0.0)	-100
HSH5	8.91(0.2)	-	4 (0.0)	-100
HSH2	9.00(0.4)	-	4 (0.0)	-100
HSP5	8.93(0.2)	-	3.67(0.6)	-100
HSP2	8.88(0.2)	-	4 (0.0)	-100
HAP5	8.17(1.7)	-	4 (0.0)	-100
HAP2	8.08(1.1)	-	4 (0.0)	-100
HAR5	8.27(0.5)	-	4 (0.0)	-100
HAR2	8.44(0.5)	-	4 (0.0)	-100
HAH5	8.26(0.5)	-	4.67(1.1)	-100
HAH2	7.80(0.3)	-	4 (0.0)	-100
HSP	8.42(0.8)	-	5.67(1.5)	-100
HAP	8.25(0.4)	-	4 (0.0)	-100
IAP	5.78(0.7)	-	12 (0.0)	-100
ISP	13.02(1.9)	-	4 (0.0)	-100
PAP	5.95(0.7)	-	4 (0.0)	-100
PSP	10.42(0.5)	-	6 (0.0)	-100

## 5.4.2 Determinación de la resistencia al choque térmico

Aunque el clima tropical se caracteriza por su homogeneidad y suave variación de las temperaturas entre estaciones, la diferencia climática que se produce entre el día y la noche puede ser bastante significativa. La fuerte radiación solar diurna produce el calentamiento de los materiales que constituyen las ruinas, llegando a alcanzar altas temperaturas. La caída del sol al anochecer constituye un gran contraste físico que puede producir que los materiales sobrecalentados se vean rápidamente contraídos debido al estrés diferencial, derivando en fisuras y fracturas que contribuyen al deterioro de estos materiales calizos.

### 5.4.2.1 Metodología de ensayo

Mediante este ensayo se pretende evaluar la durabilidad del mortero bajo el efecto de los cambios repentinos de temperatura. El ensayo se ha realizado según la normativa española UNE-EN 14066:2013 (CEN<sup>6</sup>), empleándose una probeta<sup>6</sup> de cada tipo de mortero de dimensiones 4x4x2cm.

Las probetas se secan hasta masa constante y se dejan enfriar a temperatura ambiente antes del ensayo. El procedimiento consiste en un ciclo de  $18 \pm 1$ h en una estufa ventilada a  $70 \pm 5^\circ\text{C}$ , seguido de  $6 \pm 0,5$ h de inmersión en agua corriente, que debe estar a una temperatura de  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  antes de la introducción de las probetas (Fig.5.33). Los ciclos se repiten hasta un total de 20. Seguidamente las probetas se secan a  $70 \pm 5^\circ\text{C}$  hasta alcanzar masa constante. La medición de control de los resultados se ha realizado mediante el ensayo no destructivo de densidad aparente en seco ( $d_{ap}$ ), de acuerdo a la norma española UNE-EN 1015-10 (Descrito en el punto 5.2.5), y mediante la inspección visual de la superficie.

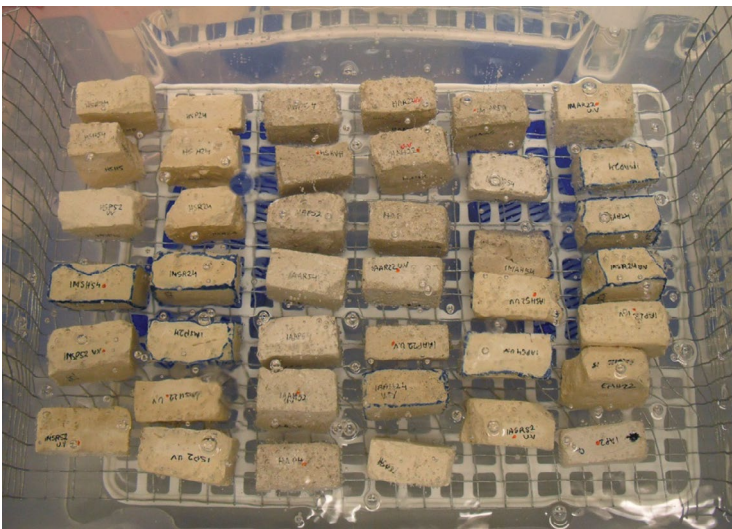


Fig. 5.33 Inmersión de las probetas tras el ciclo de temperatura para determinar su resistencia al choque térmico.

<sup>6</sup> Dada la poca disponibilidad de probetas, se realizó este ensayo con un ejemplar de cada tipo de mortero.



#### 5.4.2.2 Resultados del ensayo

Después de 20 ciclos de choque térmico, las probetas IAAR2 y PAP se han disgregado durante la inmersión 14 y 17 respectivamente, no habiendo superado el ensayo. Se observan algunos signos de desintegración de material al depositarse arena en el fondo del contenedor durante los periodos de baño; pero de forma muy sutil. El resto de probetas de los distintos grupos técnicos de mortero han superado los ciclos del ensayo y se muestran en buen estado.

##### *Inspección visual*

De la inspección visual de la superficie de las probetas se determina que el ensayo no ha producido daños importantes a nivel superficial ni interno, observándose con total cohesión tras el secado a masa constante. Dado que las probetas del mismo grupo técnico que las descartadas (IAAR2 y PAP) no han sufrido daños, se deduce que la desintegración sufrida puede deberse a la presencia de pequeñas fisuras o roturas en la superficie de dichas probetas, que han supuesto un punto de fácil acceso para el agua y la disolución acelerada del material.

##### *Comparación de la densidad aparente ( $D_{ap}$ )*

Para comprobar cambios a nivel estructural que puedan haberse producido por este ensayo, se determina la densidad aparente de dichas probetas y se comparan los datos con los obtenidos previamente (Punto 5.2.5). La densidad indica el grado de porosidad, de aireación y la capacidad de infiltración de agua en la estructura interna, por lo que un cambio significativo en esta medida podría indicar alteraciones en la estructura interna del mortero, ocasionados por la fuerte agresión del ensayo. Si los valores obtenidos decrecen, podría deberse a un aumento de la porosidad interna del mortero, ocasionado por la disolución de parte del material calcáreo. Un aumento del valor medido, podría ser sinónimo de la inclusión de agua lenta en la red porosa del mortero.

Se observan valores que decrecen en las probetas IASR2 (2288 a 1579 Kg/m<sup>3</sup>) e IMAR2 (1373 a 755 Kg/m<sup>3</sup>), así como en casi la totalidad de las probetas del grupo técnico PS (PSR2, PSH2, PSH5, PSR5, PSP5) (Tabla 5.13). El resto de probetas experimenta un incremento del valor de  $D_{ap}$ , que supone en algunos casos un gran cambio (PAP2), y en la mayoría de las probetas un incremento moderado (Gráfico 5.48).

Tabla 5.13 Volumen ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) y densidad aparente ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) de las probetas antes y después del ensayo de choque térmico.

PROBETA	Antes Ch.T		Después Ch.T	
	$V_s$ $\text{Kg}/\text{m}^3$	$D_{ap}$ $\text{Kg}/\text{m}^3$	$V_s$ $\text{Kg}/\text{m}^3$	$D_{ap}$ $\text{Kg}/\text{m}^3$
PSR2	2.80E-05	1401.51	2.80E-05	1392.19
PSH2	2.70E-05	1432.76	2.67E-05	1423.01
PSP2	2.91E-05	1475.06	2.91E-05	1489.42
PSH5	2.69E-05	1456.90	2.67E-05	1443.16
PSR5	2.81E-05	1590.00	2.82E-05	1492.34
PSP5	2.55E-05	1822.37	3.15E-05	1486.26
PAH2	2.89E-05	1278.09	2.88E-05	1301.65
PAP2	2.15E-05	1223.24	1.10E-05	2380.14
PAR2	2.00E-05	1256.82	1.82E-05	1290.14
PAH5	3.28E-05	1267.43	3.28E-05	1303.10
PAP5	2.71E-05	1286.33	2.73E-05	1307.29
PAR5	2.86E-05	1291.94	2.88E-05	1339.46
HAP2	2.67E-05	1339.30	2.68E-05	1370.39
HAH2	2.78E-05	1272.74	2.79E-05	1315.43
HAR2	2.4E-05	1259.90	2.42E-05	1304.44
HAP5	2.78E-05	1371.53	2.78E-05	1417.13
HAH5	2.65E-05	1344.38	2.68E-05	1374.77
HAR5	2.82E-05	1328.74	2.81E-05	1375.90
HSP2	2.35E-05	1447.49	2.36E-05	1458.76
HSH2	2.90E-05	1403.79	2.90E-05	1435.54
HSR2	2.52E-05	1322.72	2.51E-05	1337.95
HSH5	1.99E-05	1357.50	2.00E-05	1398.95
HSR5	2.79E-05	1449.96	2.80E-05	1465.11
HSP5	2.44E-05	1381.21	2.46E-05	1388.41
IMSR2	3.61E-05	1421.16	3.31E-05	1566.50
IMSP2	3.39E-05	1555.99	3.39E-05	1575.47
IMSH2	3.12E-05	1507.77	3.12E-05	1532.85
IMSR5	3.00E-05	1567.88	3.01E-05	1580.69
IMSP5	3.47E-05	1571.04	3.47E-05	1589.92
IMSH5	3.21E-05	1520.43	3.20E-05	1532.35
IMAH2	2.71E-05	1402.21	2.71E-05	1416.98
IMAP2	2.96E-05	1312.26	2.76E-05	1439.84
IMAR2	3.07E-05	1373.92	3.05E-05	755.41
IMAR5	2.4E-05	1357.27	2.45E-05	1371.30
IMAP5	2.68E-05	1250.31	2.66E-05	1408.68
IMAH5	2.19E-05	1038.35	2.21E-05	1272.90
IASR2	1.92E-05	2288.10	2.82E-05	1579.12
IASP2	3.37E-05	1528.82	3.36E-05	1551.58
IASH2	2.26E-05	1481.47	2.24E-05	1509.38
IASR5	3.15E-05	1591.80	3.12E-05	1632.40
IASP5	3.47E-05	1561.39	3.45E-05	1592.39
IASH5	3.19E-05	1543.27	3.17E-05	1571.47
IAAH2	2.76E-05	1351.13	2.75E-05	1373.59
IAAP2	2.40E-05	1327.97	2.38E-05	1359.20
IAAR2	2.37E-05	1316.82	-	-
IAAH5	2.8E-05	1289.03	2.87E-05	1305.14
IAAR5	2.69E-05	1285.61	2.68E-05	1451.37
IAAP5	2.63E-05	1308.77	2.63E-05	1325.74
HSP	2.80E-05	1394.38	2.79E-05	1417.27
ISP	3.69E-05	1544.28	3.67E-05	1570.40
PAP	2.20E-05	1284.47	-	-
PSP	2.96E-05	1470.69	2.94E-05	1484.60
IAP	2.31E-05	1295.56	2.29E-05	1317.18
HAP	2.67E-05	1348.52	2.67E-05	1386.02

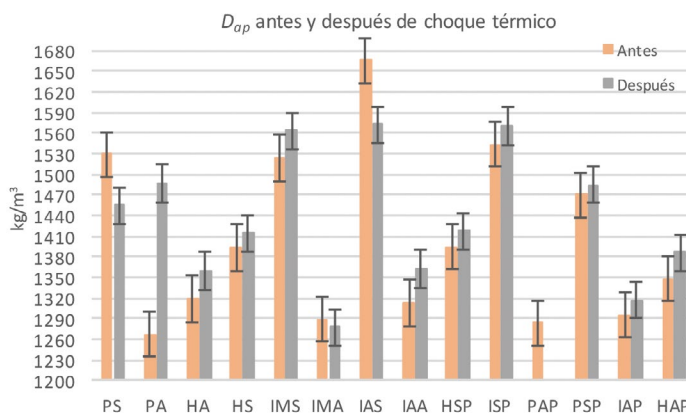


Gráfico 5.48. Comparativa de la densidad aparente de los distintos grupos técnicos antes y después del ensayo.

### 5.4.3 Determinación de la estabilidad frente a ciclos de envejecimiento acelerado por irradiación de luz ultravioleta

La luz blanca se compone por radiaciones visibles (luz natural) y radiaciones no visibles, con un número de onda que corresponde a la cantidad de ondas por centímetro. A menor número de onda, mayor es su longitud. En la zona de luz visible se emiten radiaciones de longitudes comprendidas entre 400 y 700 nm<sup>7</sup>; mientras que en la zona de ondas largas (rayos infrarrojos, microondas, radio), se emiten radiaciones por encima de 700 nm y en la zona de ondas cortas (ultravioletas, rayos x y gamma) se emiten por debajo de los 400 nm. Las ondas de longitud corta poseen mayor contenido energético que las ondas de longitudes más largas, por lo que son más agresivas y su irradiación por tiempo prolongado supone mayor peligro de deterioro en las obras.

Generalmente los materiales calcáreos naturales o artificiales, como los morteros de cal, no se ven apenas afectados por la luz (visible y no visible); son materiales muy resistentes ante las radiaciones, y los cambios físicos apreciables se producen por la conjunción de diversos factores (agua, viento, microorganismos), que generan el deterioro profundo del material.

A diferencia de éstos, los materiales orgánicos son fotosensibles, es decir, sufren graves alteraciones con la luz debido a los efectos de la energía luminosa, cuyas radiaciones electromagnéticas producen reacciones fotoquímicas en los materiales irradiados (Vaillant *et al* 2003: 111). Por este motivo se ha de tener en cuenta la adición de extractos de naturaleza orgánica en los morteros compuestos, cuya alteración puede suponer cambios significativos en la apariencia superficial del mortero. Debido a la adición de sustancias orgánicas en los morteros estudiados, se ha decidido someterlos a la irradiación de ondas ultravioletas (UV), con el fin de comprobar la estabilidad de los éstos frente a la exposición solar; cuantificar el alcance del deterioro y prever su comportamiento *in situ* a largo plazo.

<sup>7</sup> Nanómetros (nm).

### 5.4.3.1 Metodología del ensayo

Para la irradiación de luz ultravioleta se ha empleado una cámara QUV Basic de Q-Panel con lámpara UV-UVA 315, que simula la exposición lumínica exterior, y se han sometido al ensayo dos probetas de cada tipo de mortero y sus correspondientes probetas patrón. Para ello se han instalado sobre unos soportes dejando la superficie totalmente expuesta a las lámparas. Tras una prueba inicial de exposición, se verificó la ausencia de cambios perceptibles tras 100 horas de exposición a la radiación ultravioleta, por lo que se decidió ampliar el tiempo del ensayo a un total de 500 horas de exposición continuada.

Para verificar el cambio cromático superficial, se han realizado tomas colorimétricas antes y después de la exposición, empleando un espectrofotómetro Minolta CM 2600d, y realizando cinco disparos consecutivos con los cuales se ha calculado el valor promedio y la desviación estándar. Para medir el color en el mismo sitio antes y después de la exposición, se han realizado unas plantillas en acetato con un orificio por el que se apoya el espectrógrafo. Para la medición se seleccionó el observador estándar  $10^\circ$  C, el iluminante estándar CIE tipo D65 (luz día con temperatura de color  $6500^\circ$  K) y el área de medida de  $8\text{mm } \varnothing$  (Fig.5.34).



Fig. 5.34 Espectrofotómetro Minolta CM 2600d, plantillas de acetato y fichas de registro empleadas en la toma de datos.

Los datos se han registrado con componente especular incluida (SCI), con brillo, y con componente especular excluida (SCE), sin brillo. Los cálculos de las diferencias totales de color se han realizado según los métodos internacionales definidos por la *Comission Internationale de l'Éclairage* (CIE) CIELAB, recomendados en 1976. También se ha seguido la normativa española UNE-EN 15886: 2010 (CEN®). Para el estudio se ha empleado el sistema perceptivo o uniforme CIELAB, ampliamente utilizado para evaluar el color ya que correlaciona los valores numéricos de color de forma precisa con la percepción visual humana; indicando términos de luminosidad y cromatismo. Para la interpretación de los datos se han tenido en cuenta las coordenadas:

$L^*$ = luminosidad

$a^*$ = coordenadas rojo/ verde (+a indica rojo, -a indica verde)

$b^*$ = coordenadas amarillo/azul (+b indica amarillo, -b indica azul);

Calculándose a partir de los valores X, Y, Z de cada probeta (CEN 2010). Para el cálculo de las diferencias totales de color ( $\Delta E^*$ ) entre las dos mediciones ( $L^*_1, a^*_1, b^*_1$  y  $L^*_2, a^*_2, b^*_2$ ), se ha aplicado la siguiente fórmula (CIELAB<sub>76</sub>):

$$\Delta E^*_{76} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Donde:

$\Delta E^*$  Variación total del color.

$\Delta L^* = L^*_2 - L^*_1$ ; Correspondiente a la diferencia de claridad.

$\Delta a^* = a^*_2 - a^*_1$ ; Correspondiente a la diferencia de tendencia al rojo/verde

$\Delta b^* = b^*_2 - b^*_1$ ; Correspondiente a la diferencia de tendencia al amarillo/azul.

Adicionalmente se han tenido en cuenta las notaciones:

$\Delta C^* = C^*_2 - C^*_1$ ; Diferencia en el croma;  $+C^*$ , más brillante;  $-C^*$ , más oscuro

$\Delta H^* = h^*_2 - h^*_1$ ; Diferencia en el matiz).

#### 5.4.3.2 Resultados del estudio

Para la interpretación de los resultados, se ha tenido en cuenta las indicaciones de Melgosa, Pérez, Yebra y Huertas (2001):

Diferencias perceptibles de color ( $\Delta E^*$ )	(unidades CIELAB)
Diferencia umbral o justamente perceptible	0,38-0,73
Diferencia supraumbral	1,75
Gran diferencia de color	>5

De los resultados obtenidos tras el cálculo de los valores, podemos decir que de forma general, los morteros estudiados no han revelado grandes cambios cromáticos tras la exposición continuada a la irradiación ultravioleta; mostrando incrementos de color de entre 0,3 y 4,0 unidades  $\Delta E^*$ . Los parámetros más incrementados son  $L^*$ ,  $b^*$  y  $C^*$ , mientras que  $a^*$  se mantiene muy estable, revelando ninguna tendencia al enrojecimiento de las superficies.

Del grupo técnico IM, los mayores cambios (Gráfico 5.49) se encuentran en el grupo realizado con arena del sitio (IMA), donde los morteros IMAH5 e IMAR5 presentan incrementos de color de 3,7 unidades  $\Delta E^*$ , considerándose cambios notorios. El grupo realizado con *Sascab* presenta diferencias perceptibles, aunque de forma general por debajo de las 4 unidades  $\Delta E^*$ . Como morteros estables destacan IMSH2, IMSH5 e IMSP5, que se mantienen por debajo de las 2 unidades  $\Delta E^*$ , con un comportamiento muy similar a los morteros patrón.

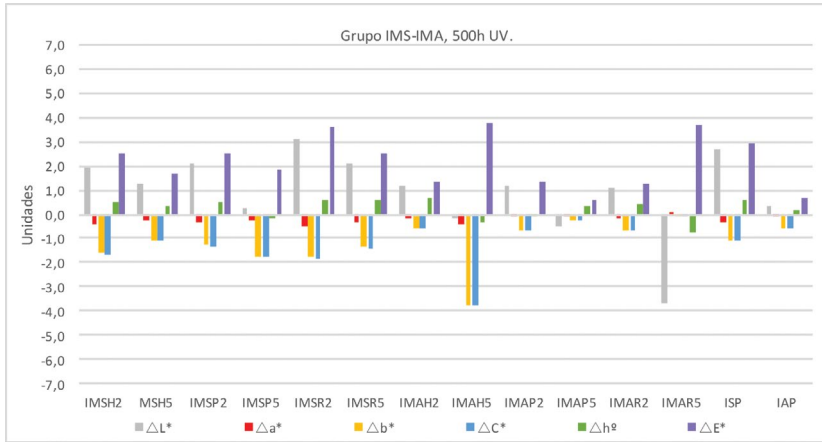


Gráfico 5.49. Representación de los incrementos  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$ ,  $\Delta C^*$ ,  $\Delta h^\circ$  y  $\Delta E^*$  de los grupos IMS e IMA (realizados mediante cal apagada por inmersión en el agua de maceraciones).

En el diagrama CIELAB (Gráfico 5.50) se observa que tras 500 h de exposición ultravioleta, las coordenadas  $a^*$  y  $b^*$  descienden aunque de forma muy ligera, lo que se traduce en una disminución de la tonalidad rojo-amarilla, que se ve reforzada por el aumento de  $\Delta L^*$ ; con lo que se puede decir que la irradiación ultravioleta ha provocado de forma sutil, el blanqueamiento de la superficie.

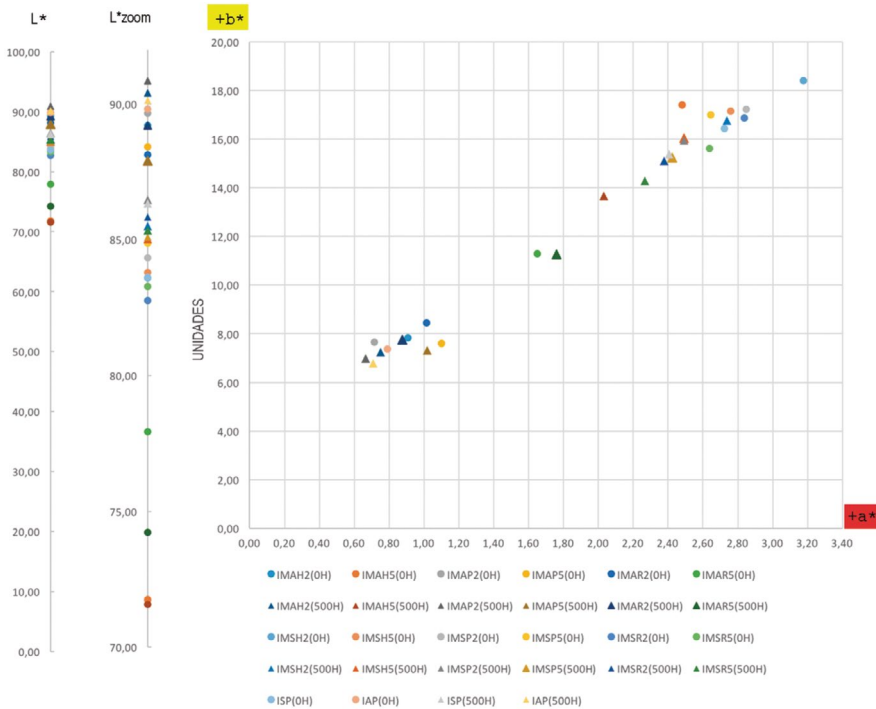


Gráfico 5.50. Diagrama CIELAB del grupo técnico IMS-IMA. Coordenadas antes de la irradiación UV y tras 500h.

En el grupo técnico IA, se aprecia una notable diferencia entre los morteros realizados con *Sascab* y los que se llevan arena del sitio. En los primeros, los cambios acontecidos son mínimos, con diferencias de color de entre 1,6 unidades  $\Delta E^*$  en la variedad IASR5 y 3 unidades  $\Delta E^*$  en la variedad IASH5. El poco incremento de la luminosidad (2,4 unidades  $\Delta L^*$  en IASH2) y la mínima variación de los parámetros  $\Delta a^*$ ; y  $\Delta b^*$  indican una buena estabilidad del cromatismo superficial. Por su parte, el grupo realizado con arena del sitio (IAA) ha sufrido cambios importantes, llegando a las 5,9 unidades  $\Delta E^*$  la variedad IAAR5, con un aumento considerable de la luminosidad, de 5,4 unidades  $\Delta L^*$  (Gráfico 5.51).

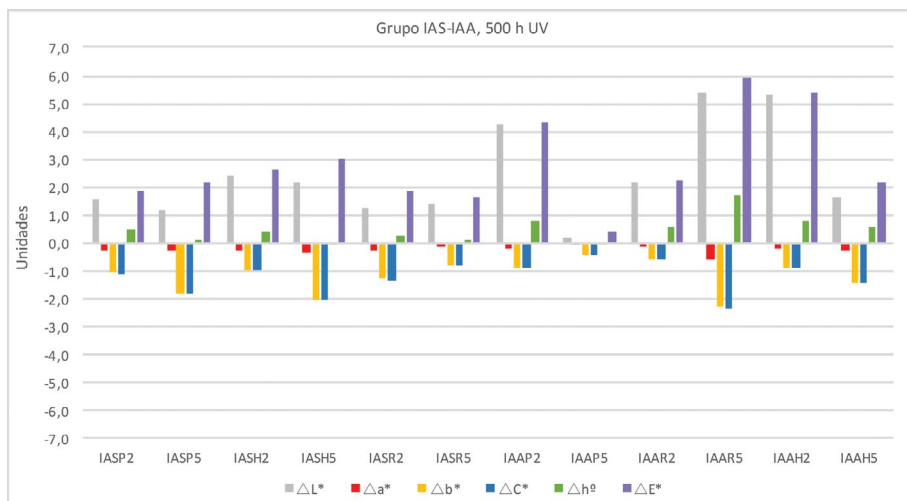


Gráfico 5.51. Representación de los incrementos  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$ ,  $\Delta C^*$ ,  $\Delta h^\circ$  y  $\Delta E^*$  de los grupos IAS e IAA (realizados mediante cal apagada por agua + la adición de maceraciones en el agua de amasado del mortero).

En el diagrama CIELAB se aprecia el ligero descenso de las coordenadas  $b^*$  y  $a^*$  después de la irradiación, y un incremento en la luminosidad  $L^*$ , revelando de nuevo la tendencia hacia el aclaramiento superficial y el enfriamiento cromático (Gráfico 5.52).

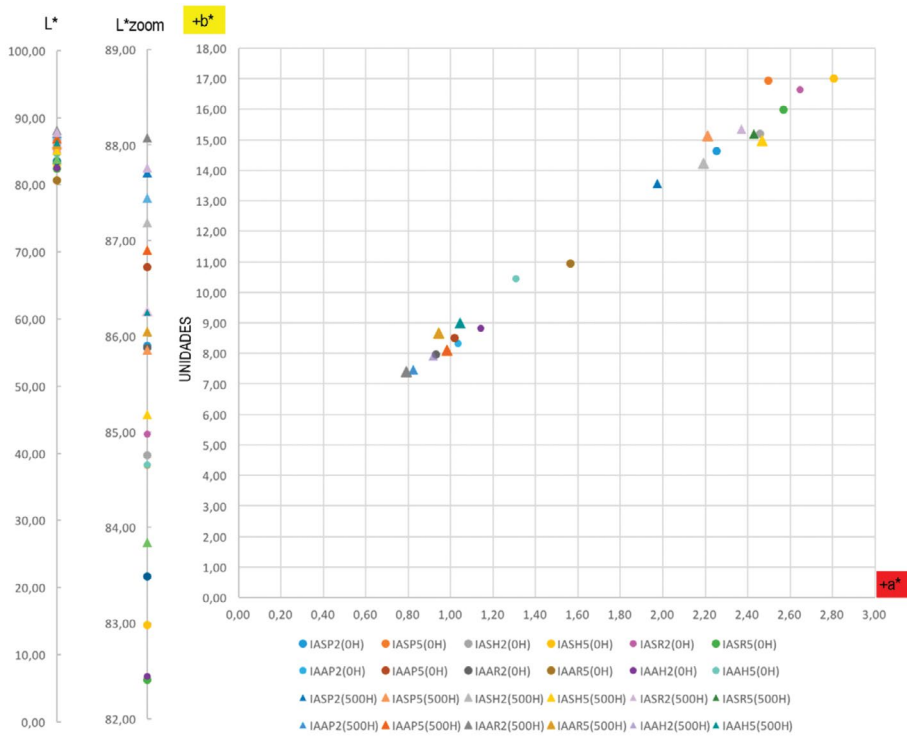


Gráfico 5.52. Diagrama CIELAB del grupo técnico IAS-IAA. Coordenadas antes de la irradiación UV y tras 500h.

En el grupo técnico P (Gráfico 5.53), realizado mediante cal apagada por pudrición, de nuevo se observan diferencias significativas entre los morteros realizados con *Sascab* y los que se componen de arena del sitio. Todas las variedades realizadas con *Sascab* se muestran muy estables con cambios que van de 0,38 unidades  $\Delta E^*$  a 2,3 unidades  $\Delta E^*$  (PSH2). Sin embargo los morteros realizados con arena blanca muestran cambios importantes que van de 2 unidades  $\Delta E^*$  en la variedad PAR5 a 6,7 unidades  $\Delta E^*$  en PAH2, con un incremento importante del parámetro  $b^*$  de -3,9 unidades  $\Delta b^*$  que se traduce en un descenso del amarillento superficial. Este hecho se observa mejor en el diagrama CIELAB (Gráfico 5.54) con las coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ , antes y después de la exposición.



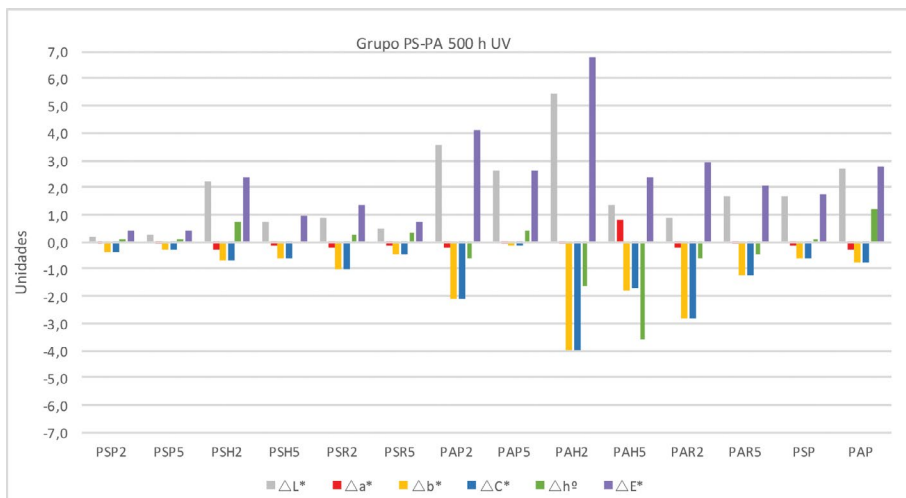


Gráfico 5.53. Representación de los incrementos  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$ ,  $\Delta C^*$ ,  $\Delta h^\circ$  y  $\Delta E^*$  de los grupos PS e PA (realizados mediante cal apagada por pudrición +la adición de maceraciones en el agua de amasado del mortero).

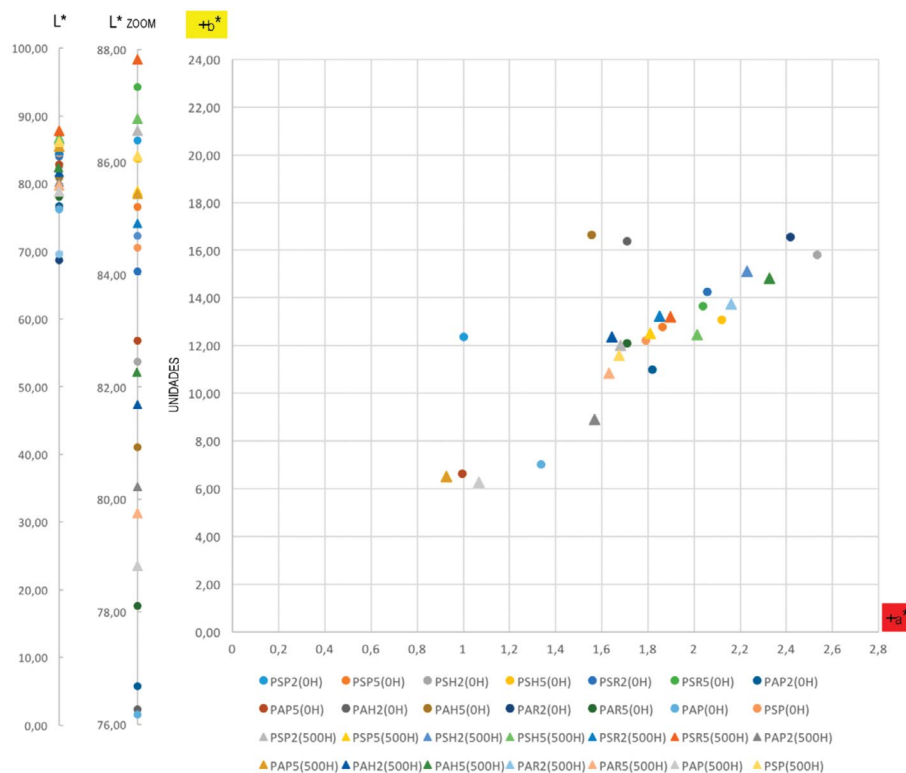


Gráfico 5.54. Diagrama CIELAB del grupo técnico PS-PA. Coordenadas antes de la irradiación UV y tras 500h.

El grupo técnico H ha revelado resultados muy similares tanto para los morteros realizados con *Sascab* como para los realizados con arene del sitio. En general los cambios de color (Gráfico 5.55) son considerables ya que el incremento se sitúa entre 2 y 5 unidades  $\Delta E^*$ ; a diferencia de los otros grupos técnicos, este revela un mayor incremento en los parámetros  $b^*$  y  $C^*$ , llegando a -4 unidades  $\Delta b^*$  y  $\Delta C^*$  en la variedad HAR2.

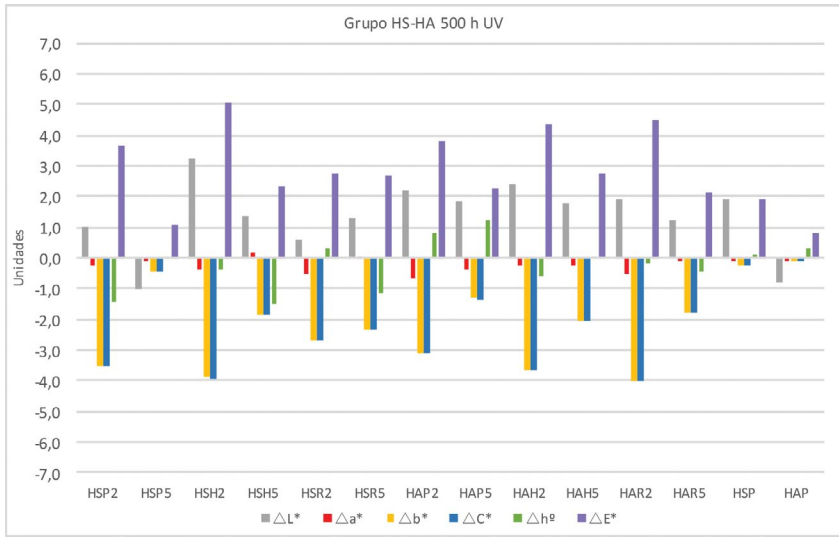


Gráfico 5.55. Representación de los incrementos  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$ ,  $\Delta C^*$ ,  $\Delta h^\circ$  y  $\Delta E^*$  de los grupos HS e HA (realizados mediante cal apagada por mezclado en caliente+ el agua de las maceraciones).

Sin embargo el incremento de la luminosidad es significativamente menor que en los anteriores grupos, con lo que se puede decir que este grupo técnico no tiene tendencia al aclaramiento superficial y sí al cambio cromático, con tendencia al enfriamiento cromático, o a la reducción de la tonalidad amarillenta(Gráfico 5.56). Paralelamente, los grupos patrón HSP y HAP se muestran muy estables con apenas cambios de color. Con ello se verifica que la oscilación cromática de los morteros tras 500h de exposición a luz ultravioleta deriva de la oxidación de los aditivos orgánicos añadidos de distinto modo al mortero.

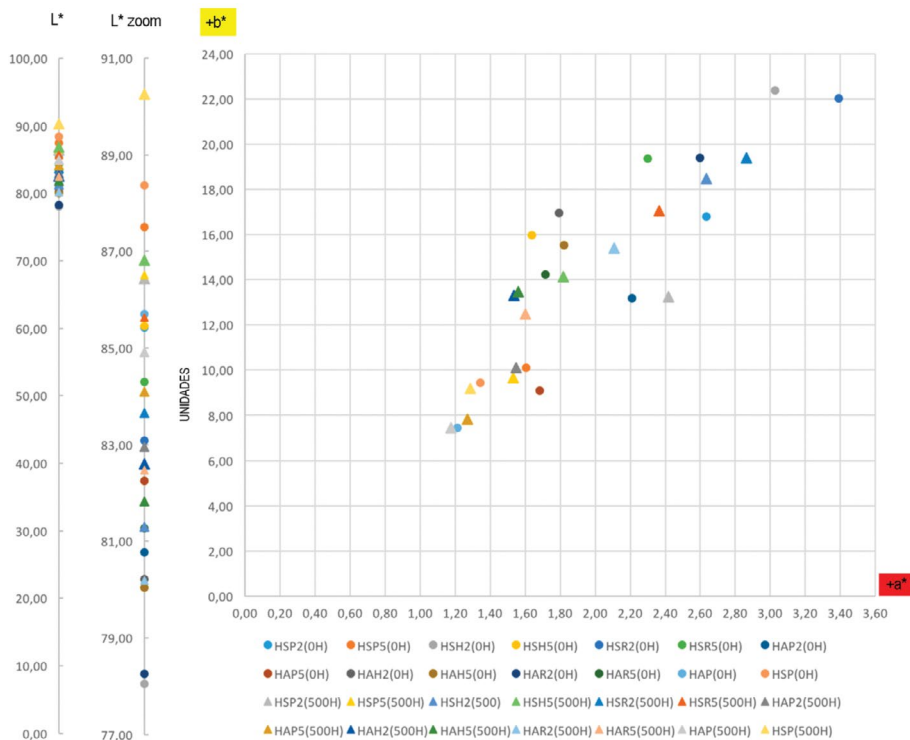


Gráfico 5.56. Diagrama CIELAB del grupo técnico HS-HA. Coordenadas antes de la irradiación UV y tras 500h.

Generalmente los cambios cromáticos tras la irradiación de luz ultravioleta no son muy grandes, pero sí se ha observado mayor estabilidad cromática en los morteros de cada grupo técnico elaborados con *Sascab*. La adición de los aditivos orgánicos ha supuesto mayor cambio cromático que sus homólogos sin aditivos (Patrones); revelando los mayores incrementos en unidades  $\Delta E^*$  los morteros realizados con la adición de exudado de Habín (*Piscidia Piscipula L.*) (IMAH5=3,77 unidades  $\Delta E^*$ ; IAAH2= 5,3 unidades  $\Delta E^*$ ; PAH2=6,7 unidades  $\Delta E^*$ ) y con el exudado de Ramón (*Brosimum Alicastrum*) (IMAR5=3,7 unidades  $\Delta E^*$ ; IMSR2=3,5 unidades  $\Delta E^*$ ; IAAR5= 5,9 unidades  $\Delta E^*$ ; HAR2=4,4 unidades  $\Delta E^*$ ). A pesar de ser de tonalidad muy rojiza, el exudado de Pixoy (*Guazuma Ulmifolia*) ha demostrado tener más estabilidad cromática en todos los grupos técnicos estudiados. Aunque las máximas diferencias suponen un cambio significativo de color, hay que tener en cuenta que el mortero seleccionado para la restauración, que sea aplicado en el sitio, estará protegido de la luz y la irradiación Ultravioleta será mínima; garantizándose su estabilidad cromática a largo plazo.

#### 5.4.4 Determinación de la estabilidad frente a ciclos de envejecimiento acelerado por exposición a humedad y temperatura

Este ensayo experimental pretende someter a los materiales a un proceso cíclico de alteración o envejecimiento, con el fin de “predecir” la respuesta que los materiales en estudio tendrán ante determinadas condiciones climáticas y en un periodo de tiempo relativamente largo. El ensayo combina la acción del agua y de la temperatura, simulando los cambios habituales a los que estos materiales calcáreos se ven sometidos en su ubicación original (En el caso de estudio que nos ocupa, la combinación de estos agentes climatológicos son muy frecuentes debido al clima tropical, con altas temperaturas diurnas y lluvias constantes). Los daños en las probetas de mortero son causados por la acción disolvente del agua, potenciados por la temperatura y por la repetición cíclica.

##### 5.4.4.1 Metodología del ensayo

El ensayo ha consistido en la exposición durante periodos sucesivos a condiciones ambientales de dos variables (Humedad y temperatura) de modo cíclico. Para determinar los parámetros climáticos se ha seguido la normativa española UNE-EN ISO 9142:2003 (CEN®) Anexo D1; manteniendo cada ciclo las siguientes condiciones:

- (24 ± 1) h a una temperatura de (23 ± 2) °C y una humedad relativa del 90%
- (24 ± 1) h a una temperatura de (55 ± 2) °C y una humedad relativa del 30%
- (72 ± 1) h a una temperatura de (23 ± 2) °C y una humedad relativa del 90%
- (48 ± 1) h a una temperatura de (55 ± 2) °C y una humedad relativa del 30%

Las probetas se han acondicionado previamente y posteriormente a cada ciclo en condiciones:

- (24 ± 1) h a una temperatura de (23 ± 2) °C y una humedad relativa del 50%.

El ensayo ha tenido una duración de cuatro ciclos completos, siendo un total de 32 días. El equipo empleado consta de una estufa de aire caliente Grupo-SELECTA®, con incorporación de agua para conseguir las condiciones de 55 ± 2°C y 30% HR; y un desecador de vidrio con incorporación de agua para conseguir una HR de 90% a temperatura ambiente (23 ± 2)°C (Fig. 5.35). El seguimiento de las condiciones climáticas se ha realizado mediante un *data logger* SCORT RH iLog®.

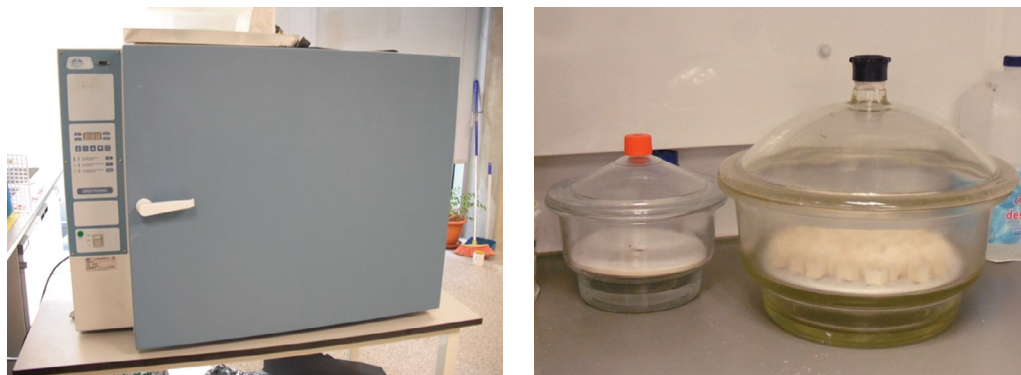


Fig. 5.35 Equipo empleado para los ciclos de humedad y secado: estufa de aire caliente y desecadores de vidrio.

Para la evaluación de la alterabilidad de las probetas en este ensayo se han realizado una serie de registros y ensayos previos que han sido repetidos y comparados al término de éste:

- Cuantificación de la masa ( $m_i$ ) y ( $m_o$ )
- Fotografías por microscopía óptica
- Difracción de rayos x (XRD)
- Evaluación de los cambios en el comportamiento hídrico.

#### 5.4.4.2 Resultados del ensayo. Evaluación de los cambios físico-químicos experimentados

##### *Variación de la masa*

Los resultados del cálculo de la masa perdida se muestran en la tabla 5.14. Los porcentajes de masa perdida tras la exposición a estos ciclos, se mantiene en torno al 27%, siendo los grupos PS e IMS los que mayor porcentaje de masa perdida experimentan (Gráfico 5.55). Despuntando de estas medias, se observan las probeta HSR2 con un 37,10% de pérdida, e IASP5 con un 15,50% de pérdida, que presentan el mayor y menor valor registrado. Comparando cada grupo técnico con su correspondiente probeta patrón (realizada sin la adición de extractos orgánicos), se observa que los promedios de pérdida de masa son muy similares en la mayoría de grupos, siendo de -29,06% para el grupo PS (-29,06% en probeta patrón PSP); -27,06% en el grupo PA (-25,31% en probeta patrón PAP); -27,69% en el grupo HA (-27,92% en probeta patrón HAP); -29,39% en el grupo HS (-28,71% en probeta patrón HSP). Únicamente se observa una diferencia más marcada entre los grupos IAS (-27,13%) e IMS (-29,78%) con su probeta patrón ISP (-30,28%); y entre los grupos IAA (-27,61%) e IMA (-27,29%) con respecto a su probeta patrón IAP (-31,27%). En ambos casos, las probetas patrón experimentan mayor porcentaje de pérdida de masa que sus equivalentes, realizados con la incorporación de los extractos orgánicos. De ello se deduce que la incorporación de los extractos orgánicos en el apagado de la cal por inmersión (IAA, IMA, IAS e IMS) produce un mortero más duro y cohesionado y por lo tanto más resistente a los agentes externos de deterioro.

Tabla 5.14 Masa inicial y final (gr.) de las probetas y porcentaje de pérdida registrado (%) (desviación estándar entre paréntesis).

PROBETA	<i>Mi</i>	<i>Mf</i>	% pérdida
ISP	54,67(0,26)	38,12(0,05)	-30,28
IAP	31,07(1,29)	21,35(3,15)	-31,27
PSP	44,19(2,16)	31,35(1,32)	-29,06
PAP	27,64(3,11)	20,65(1,92)	-25,31
HSP	41,45(2,97)	29,55(1,77)	-28,71
HAP	39,06(4,62)	28,15(2,97)	-27,92
IASH5	51,53(1,14)	36,20(0,64)	-29,75
IASH2	39,46(0,13)	28,33(0,03)	-28,21
IASP5	44,34(9,48)	37,47(2,14)	-15,50
IASP2	51,18(1,39)	35,99(0,84)	-29,68
IASR5	56,76(0,38)	39,65(0,27)	-30,14
IASR2	47,08(2,76)	33,20(2,04)	-29,48
IAAH5	38,08(0,74)	27,80(0,0)	-27,00
IAAH2	41,73(0,54)	29,78(0,24)	-28,64
IAAP5	37,45(0,62)	27,05(0,51)	-27,77
IAAP2	34,28(6,75)	24,96(4,38)	-27,19
IAAR5	34,97(0,61)	25,34(0,19)	-27,55
IAAR2	38,64(5,50)	28,01(3,73)	-27,52
PSH5	44,43(3,87)	31,48(2,72)	-29,15
PSH2	42,00(1,93)	29,86(1,51)	-28,90
PSP5	47,58(1,48)	33,59(0,80)	-29,41
PSP2	44,05(3,89)	31,28(2,29)	-28,99
PSR5	42,85(0,06)	30,41(0,14)	-29,03
PSR2	41,71(1,88)	29,67(1,29)	-28,88
PAR5	37,63(3,53)	27,15(2,34)	-27,85
PAR2	27,69(0,43)	20,60(0,57)	-25,59
PAP5	32,72(0,91)	23,89(0,71)	-27,00
PAP2	30,76(0,28)	22,49(0,04)	-26,89
PAH5	37,30(2,94)	26,86(2,09)	-28,00
PAH2	34,32(0,95)	25,05(0,38)	-27,00
IMSP5	49,86(1,67)	35,06(0,96)	-29,68
IMSP2	51,39(2,52)	36,19(1,58)	-29,58
IMSR5	52,32(0,71)	36,65(0,31)	-29,95
IMSR2	49,39(5,39)	34,77(3,62)	-29,60
IMSH5	47,11(7,77)	32,81(5,60)	-30,35
IMSH2	46,50(0,25)	32,77(0,16)	-29,52
IMAR5	32,28(2,62)	23,68(1,55)	-26,66
IMAR2	38,12(4,57)	27,50(3,09)	-27,87
IMAH5	26,89(1,19)	20,24(0,70)	-24,75
IMAH2	40,63(4,66)	29,12(2,88)	-28,33
IMAP5	35,48(0,62)	25,82(0,33)	-27,23
IMAP2	36,59(6,42)	26,45(3,93)	-27,71
HAP5	36,77(0,73)	26,52(0,27)	-27,87
HAP2	35,02(2,82)	24,52(0,0)	-29,97
HAR5	35,25(0,06)	25,56(0,13)	-27,49
HAR2	31,55(0,86)	23,16(0,75)	-26,59
HAH5	33,96(3,25)	24,79(2,16)	-26,99
HAH2	34,48(1,10)	25,10(0,66)	-27,21
HS5	35,60(2,39)	25,88(1,61)	-27,30
HS2	40,53(6,54)	28,88(3,95)	-28,74
HSR5	36,66(1,96)	26,49(1,08)	-27,75
HSR2	33,69(5,47)	21,19(2,42)	-37,10
HSP5	35,72(3,94)	25,97(2,47)	-27,29
HSP2	39,80(4,60)	28,58(3,05)	-28,19

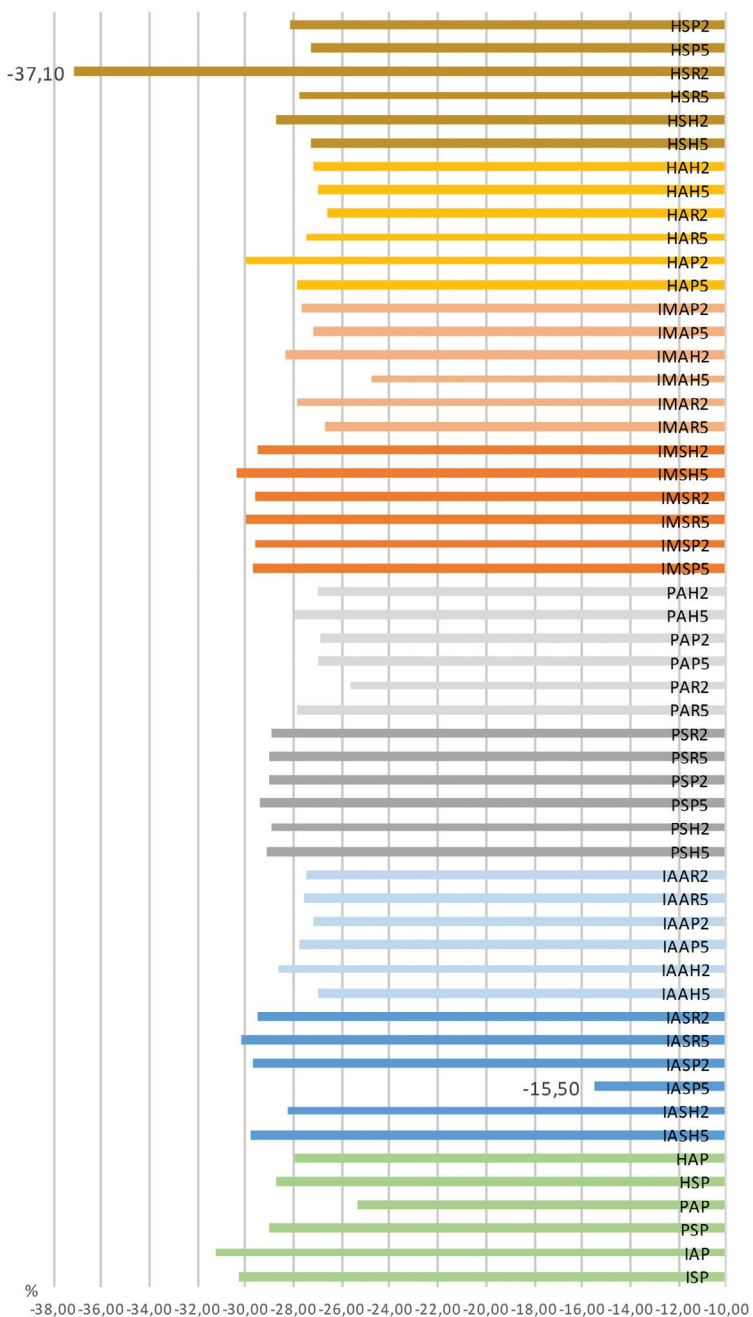


Gráfico 5.55. Porcentaje de pérdida de masa para cada tipo de mortero tras los ciclos de humedad y temperatura.

### Microscopía óptica

La inspección visual mediante microscopía óptica ha permitido la observación minuciosa y el registro gráfico de la superficie de las probetas antes y después del envejecimiento para poder constatar con mayor rigurosidad cambios o alteraciones apreciables en el material. Estas imágenes han sido realizadas en el Servicio de Microscopía Electrónica de la *Universitat Politècnica de València*, empleando una lupa binocular con lente Leica® y cámara digital acoplada. Los cambios acontecidos en la superficie de las probetas tras los ciclos de humedad y secado son casi imperceptibles; destacando como única alteración la aparición puntual de microorganismos (mohos) en las probetas del grupo PS (PSH5, PSH2, PSP5 Y PSR5) (Fig.5.36-5.44).

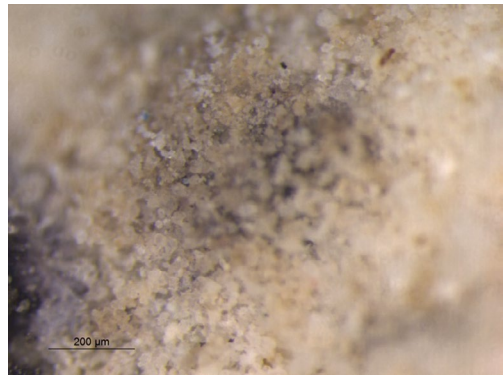
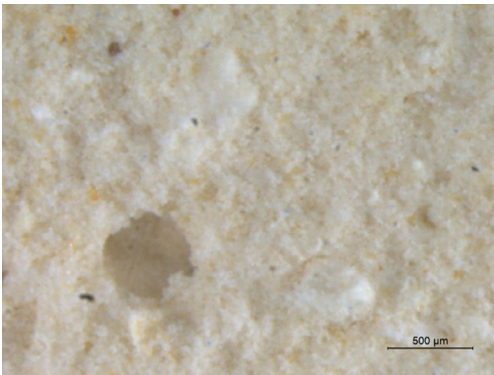


Fig. 5.36 y 5.37 Detalle de probeta PSH5 antes y después del ensayo cíclico. Apreciación de mancha oscura por presencia de microorganismos.

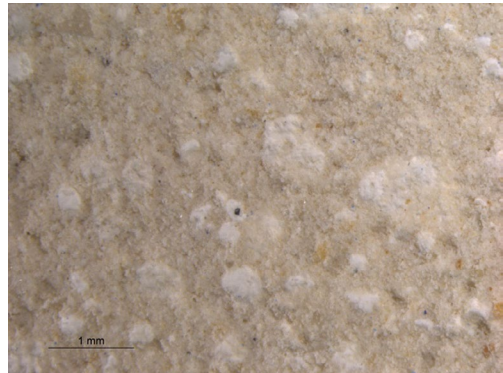
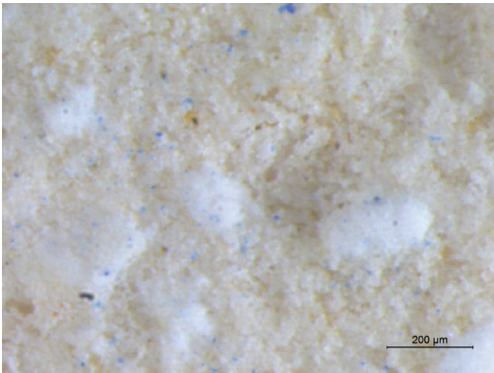


Fig. 5.38 y 5.39 Detalle de probeta PSH2 antes y después del ensayo cíclico. No se aprecian cambios superficiales.



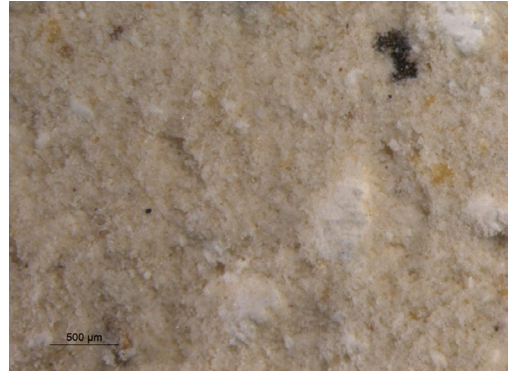
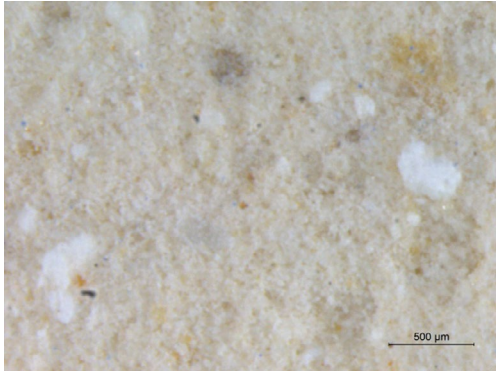


Fig. 5.40 y 5.41 Detalle de probeta PSP5 antes y después del ensayo cíclico. Apreciación de mancha oscura por presencia de microorganismos.

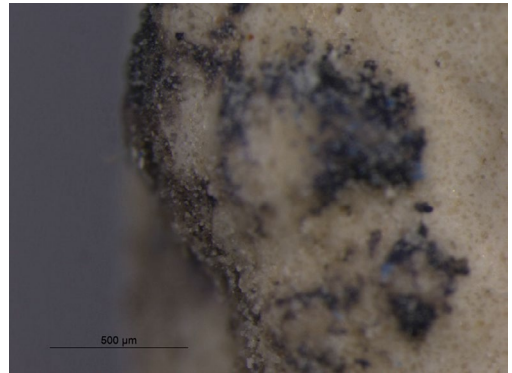
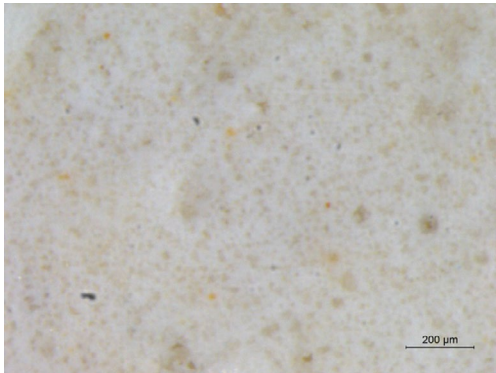


Fig. 5.42 y 5.43 Detalle de probeta PSR5 antes y después del ensayo cíclico. Apreciación de mancha oscura en una arista por presencia de microorganismos.

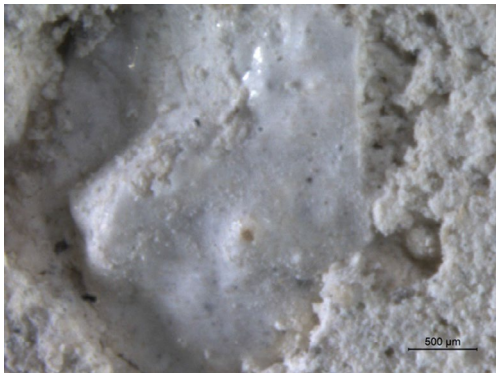


Fig. 5.44 Detalle de caliche en la probeta HAR2 antes y después del ensayo cíclico. No se aprecian cambios en la superficie.

### *Difracción de rayos x (XRD)*

La difracción de rayos x (XRD), es una técnica espectrométrica no destructiva que permite el análisis cuantitativo y cualitativo de minerales mediante la difracción de rayos x, identificando las diferentes fases cristalinas existentes en una muestra, así como la caracterización estructural y microestructural de sólidos. Debido a que las longitudes de onda de los rayos x son del mismo orden que las distancias interatómicas de los cristales, estos actuarán como redes de difracción, difractando los rayos x en direcciones determinadas y con intensidades características en función de su estructura cristalina. La microestructura del material delimita la extensión en la que la estructura cristalina permanece inalterada; los defectos cristalinos y el tamaño de los granos afectan a la forma del perfil de difracción del material, haciendo posible su estudio a través de esta técnica (ICMUV 2019). El análisis se efectúa mediante la comparación de patrones de difracción de una muestra desconocida con los patrones de difracción de compuestos conocidos y recopilados en una base de datos.

Por medio de este análisis se puede conseguir una caracterización químico mineralógica de las probetas de mortero, que en este caso nos será esencial para establecer una comparativa entre las probetas antes y después de ser envejecidas, y determinar los posibles cambios químicos producidos internamente como el desarrollo de nuevos productos de deterioro (sales). Aunque somos conscientes de que mediante esta técnica no nos es posible medir los procesos de degradación producidos por los componentes orgánicos de las probetas, que son identificables mediante técnicas cromatográficas; dentro de nuestras posibilidades, se decidió escoger esta técnica analítica (XRD), en vez de la microscopía electrónica de barrido (SEM), dado que se necesita una técnica 100% cuantificadora para poder recoger las sutiles diferencias producidas en las probetas tras los envejecimientos por humidificación y secado.

Los análisis se realizaron a través del *Laboratori d'Anàlisi i Diagnòstic d'Obra d'Art de la Facultat de Geografia e Historia de València*, en el Servicio de Difracción de rayos x del Parque Científico de la *Universitat de València*, empleando para ello un difractor de XRD, sistema Bruker D8 Advance, operando en el modo  $\Theta/\Theta$ . La configuración del generador fue de 40 kV, 40 mA, ánodo Cu ( $\text{Cu-K}\alpha = 1.5418 \text{ \AA}$ ). El filtro utilizado fue de Ni, el rango de  $2\theta$  5-80°, el tamaño de paso de 0.01°, la velocidad de escaneo de 0.5° min<sup>-1</sup>. La determinación cualitativa de fase se llevó a cabo utilizando el software QualX 2.0 (Altomare *et.al*, 2015) y la base de datos correlacionada (Gražulis *et.al*, 2009). El análisis de fase cuantitativa (QPA) se llevó a cabo utilizando el software Quanto (Altomare *et.al*, 2001).

Se tomaron un total de 15 muestras de probetas, que comprenden 4 antes del envejecimiento y 8 después de los ciclos de humidificación y secado. También se tomaron muestras para el análisis comparativo de las materias primas de elaboración de las probetas: arena blanca, *Sascab* y cal apagada (Tabla 5.15).

Tabla 5.15. Relación de muestras analizadas por XRD antes y después de los envejecimientos por humidificación y secado.

MUESTRA	DESCRIPCIÓN	ESTADO
<i>Sascab</i>	<i>Sascab</i> procedente de <i>Sascabera</i> de Paxcamán	
Arena	Recogida de las inmediaciones de La Blanca	
Cal	De San Benito, apagada por pudrición	
IMAR5E	Cal apagada por inmersión en maceración de Ramón al 0,5% y arena	envejecida
IAAR5E	Cal apagada por inmersión en agua con arena y aditivo de agua de Ramón al 0,5%	envejecida
PAH5E	Cal apagada por pudrición con arena y agua de Habín al 0,5%	envejecida
IASH2E	Cal apagada por inmersión en agua con arena y adición de agua de Habín al 2%	envejecida
PSH2E	Cal apagada por pudrición con <i>Sascab</i> y aditivo de agua de Habín al 2%	envejecida
IMSP2E	Cal apagada por inmersión en maceración de Pixoy al 2% y <i>Sascab</i>	envejecida
HSR2E	Cal apagada por mezcla en caliente con <i>Sascab</i> y aditivo de agua de Ramón al 2%	envejecida
HAP5E	Cal apagada por mezcla en caliente con arena y aditivo de Pixoy al 0,5%	envejecida
PAH5NE	Cal apagada por pudrición con arena y aditivo de Habín al 0,5%	no envejecida
HAP5NE	Cal apagada por mezcla en caliente con arena y aditivo de Pixoy al 0,5%	no envejecida
IMAR5NE	Cal apagada por inmersión en maceración de Ramón al 0,5% y arena	no envejecida
IASH2NE	Cal apagada por inmersión en agua con <i>Sascab</i> y aditivo de agua de Habín al 2%	no envejecida

Los resultados de los análisis mediante difracción de rayos x de las probetas de mortero, revelan que apenas se producen variaciones en éstas una vez se han sometido a la exposición de agentes de deterioro durante un tiempo continuado y prolongado; determinando que la resistencia y durabilidad de todos los grupos de mortero realizados es alta, y que son adecuados para su aplicación en ambientes con alto porcentaje de temperatura y humedad relativa, así como sus posibles variaciones estacionarias (Anexo 2).

Dado que la fase cristalina que se identifica en este análisis es la del hidróxido de calcio, y que todas las probetas han sido elaboradas con hidróxido de calcio, los resultados que se observan en los difractogramas de cada muestra son muy similares, apareciendo como principal componente la calcita, representada con el pico más alto. En los difractogramas que corresponden a las materias primas, se observa el mismo patrón para las tres muestras, siendo la calcita el pico más destacado en todas las materias primas, y concretamente en mayor cantidad en la muestra de arena blanca.

En cuanto a los elementos que aparecen al lado derecho de los gráficos, corresponden a silicatos arcillosos y también sílice. Ambos elementos están asociados a la cal y se corresponde a la composición natural de los suelos de la región de Petén. Este hecho se constata con los análisis efectuados a los estucos y bases de preparación realizados por el Proyecto (Doménech y Vázquez de Ágredos 2006) en los primeros años de trabajo, donde se observa esta asociación de cal y sílice casi en la totalidad de las muestras analizadas (Pág.113). Los elementos que aparecen en la parte izquierda del difractograma, corresponden al “ruido” producido por la presencia de materia orgánica, que en el caso de la arena blanca, la cal y el *Sascab*, es prácticamente inexistente.

### *Probetas no envejecidas*

De forma similar, las muestras de mortero analizadas previamente a los ciclos de envejecimiento por humidificación y secado muestran resultados muy parecidos a las materias primas. El recuento de calcita es sobresaliente en todas las muestras que aparece siempre asociada a sílice y otros minerales arcillosos, representados en la parte derecha del gráfico. En la parte izquierda, se observa de nuevo la presencia de ruido correspondiente con la porción orgánica, aunque su presencia no es destacada a pesar de contener los aditivos orgánicos. Estos picos tampoco se intensifican en las probetas realizadas con el exudado al mayor porcentaje (2%), ni muestra diferenciación entre unas gomas u otras (Fig. 5.45 y Fig. 5.47).

### *Probetas envejecidas*

Los análisis efectuados en las probetas sometidas a los ciclos de envejecimiento no han mostrado variación compositiva apreciable, revelando unos difractogramas muy similares a los anteriores. En todas las muestras el pico de calcita sobresale en un rango similar a las probetas sin envejecer ( $\pm 4000$ ), observándose un recuento parecido de minerales asociados en la parte derecha, así como los mismos niveles de ruido en la zona izquierda, correspondiente con la fracción de materia orgánica de las muestras. Es por ello, que comparativamente no se aprecian cambios compositivos ni cuantitativos en las probetas tras los envejecimientos, por lo que se consideran morteros estables y duraderos frente a condiciones variables de humedad y temperatura (Fig. 5.46 y Fig. 5.48).

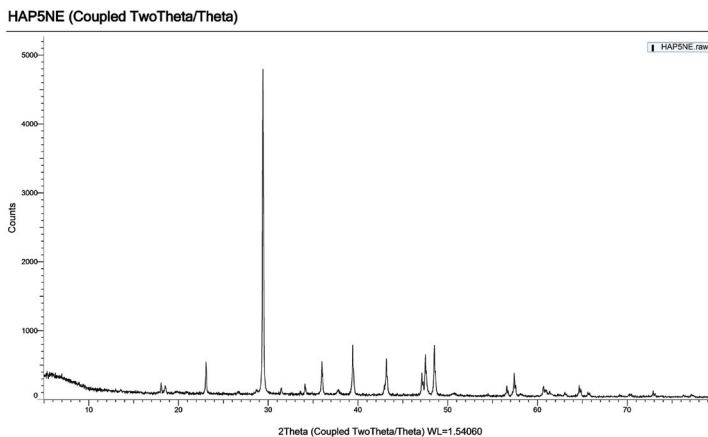


Fig. 5.45 Difractograma correspondiente al mortero HAP5 antes de los ciclos de envejecimiento acelerado.

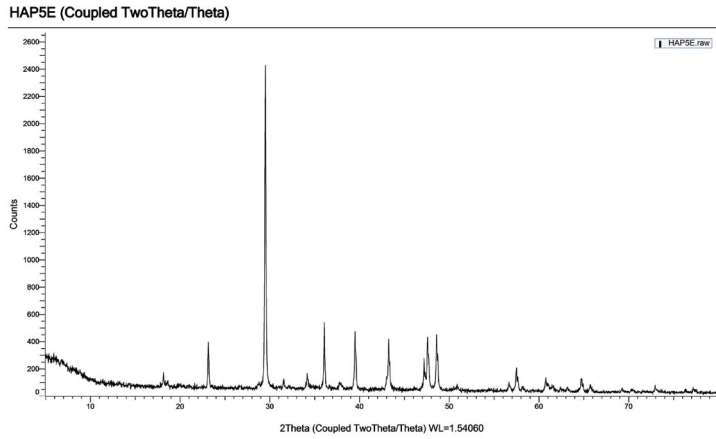


Fig. 5.46 Difractograma correspondiente al mortero HAP5 tras los ciclos de envejecimiento acelerado.

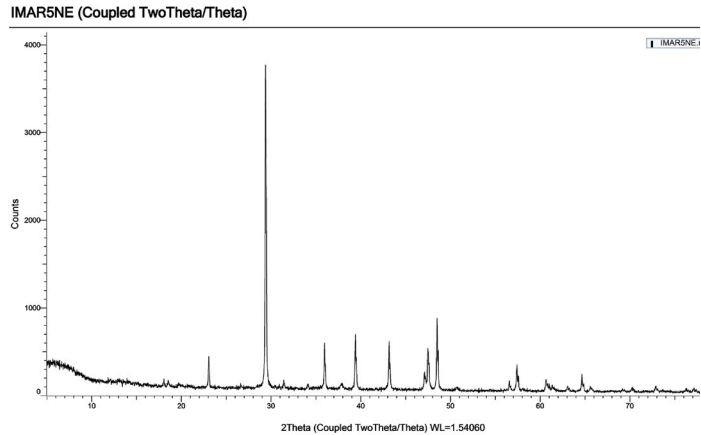


Fig. 5.47 Difractograma correspondiente al mortero IMAR5 antes de los ciclos de envejecimiento acelerado.

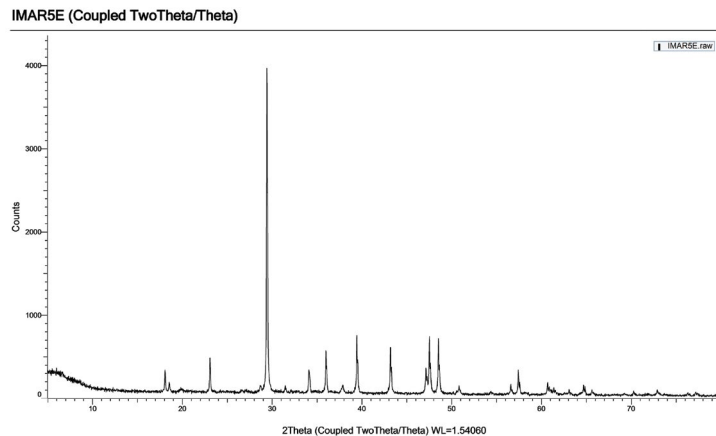


Fig. 5.48 Difractograma correspondiente al mortero IMAR5 tras los ciclos de envejecimiento acelerado.

### *Determinación de la absorción de agua por capilaridad de las probetas envejecidas*

El ensayo se ha repetido empleando la misma metodología que la descrita anteriormente en el punto 5.2.1. Las probetas empleadas se extraen de la sección de dos probetas envejecidas en los ciclos de humedad y temperatura, de forma que se obtienen dos cubos de 2x2x1 cm. El tiempo de duración del ensayo son 230 horas y el resultado de la masa ganada se expresa en  $\text{gr}/\text{cm}^2$ . En la tabla 5.16 se exponen los rangos promedio y la desviación estándar de cada tipo de mortero.

Los rangos promedio de absorción de agua por capilaridad ( $\text{gr}/\text{cm}^2$ ) observados en cada grupo técnico son similares (Gráficos 5.56-5.64), siendo 0,046  $\text{gr}/\text{cm}^2$  para HA, 0,040  $\text{gr}/\text{cm}^2$  para HS, 0,044  $\text{gr}/\text{cm}^2$  para el grupo PA, 0,043  $\text{gr}/\text{cm}^2$  para PS, 0,048  $\text{gr}/\text{cm}^2$  en IAA, 0,049  $\text{gr}/\text{cm}^2$  en IAS, 0,049 para IMA y 0,039 para IMS. El tipo de mortero que mayor índice de absorción presenta es IMAH5 con 0,056  $\text{gr}/\text{cm}^2$ , mientras que el valor más bajo registrado es para HSH5 e IASH2 con 0,033  $\text{gr}/\text{cm}^2$  absorbidos. Los morteros realizados con *Sascab* como árido presentan un volumen de absorción ligeramente menor que sus grupos homólogos, realizados con la arena blanca del sitio. Esto es debido a la menor granulometría del *Sascab*, que confiere un mortero con una porosidad más reducida y por tanto con más resistencia a la penetración del agua. Las curvas de absorción representan una velocidad inicial bastante similar para todos los grupos, produciéndose la estabilización entre las primeras 6 y 7 pesadas. Las probetas patrón también muestran un comportamiento muy similar con respecto a su grupo realizado con aditivos orgánicos, a excepción del grupo patrón PSP que muestra un índice de absorción muy superior a todos los morteros de su grupo PS.

En comparación con los resultados observados en el mismo ensayo realizado a las probeta sin envejecer (Punto 5.2.1), las curvas de absorción representadas en los gráficos son muy parecidas, pero en general se observa una disminución en el índice de absorción promedio de cada grupo técnico, a excepción del grupo PS que muestra un coeficiente de absorción muy similar (0,046  $\text{gr}/\text{cm}^2$  antes del envejecimiento y 0,043  $\text{gr}/\text{cm}^2$  después de ser envejecidas), y el grupo de Patrones cuyo coeficiente de absorción era menor antes de ser envejecidas (0,069  $\text{gr}/\text{cm}^2$  antes y 0,079  $\text{gr}/\text{cm}^2$  después). Como se observó en el conjunto de ensayos hídricos realizado anteriormente, la adición de sustancias orgánicas incrementa la absorción de agua; por lo que el hecho de que las probetas muestren menor absorción de agua tras los ciclos de envejecimiento podría deberse al deterioro y pérdida de parte de estas sustancias en el interior del mortero.

Tabla 5.16 Coeficiente de absorción de agua por capilaridad antes y después del envejecimiento. Promedio de absorción por mortero y por subgrupo técnico (gr/cm<sup>2</sup>).

PROBETA	ANTES ENVEJECIMIENTO		DESPUÉS ENVEJECIMIENTO	
	PROMEDIO	$\delta$	PROMEDIO	$\delta$
IASP5	0,517	0,212	0,412	0,197
IASP2	0,532	0,179	0,418	0,200
IASH5	0,451	0,190	0,336	0,170
IASH2	0,649	0,262	0,342	0,146
IASR5	0,584	0,256	0,372	0,204
IASR2	0,641	0,252	0,286	0,147
$\bar{x}$	0,563	0,036	0,36	0,03
HAH5	0,759	0,290	0,427	0,187
HAH2	1,059	0,482	0,423	0,192
HAP5	1,805	0,817	0,456	0,243
HAP2	0,729	0,294	0,460	0,215
HAR5	0,804	0,303	0,390	0,186
HAR2	0,997	0,440	0,404	0,204
$\bar{x}$	1,026	0,203	0,43	0,02
HSP5	0,747	0,263	0,523	0,157
HSP2	0,837	0,271	0,494	0,186
HSR5	0,965	0,350	0,360	0,152
HSR2	0,711	0,285	0,433	0,183
HSH5	0,782	0,299	0,337	0,143
HSH2	0,703	0,321	0,368	0,174
$\bar{x}$	0,791	0,033	0,42	0,02
IAAP5	0,797	0,247	0,435	0,193
IAAP2	0,699	0,291	0,350	0,177
IAAH5	0,881	0,344	0,472	0,207
IAAH2	0,910	0,364	0,491	0,230
IAAR5	0,891	0,343	0,477	0,216
IAAR2	0,726	0,310	0,541	0,275
$\bar{x}$	0,817	0,043	0,46	0,03
IMAH5	0,520	0,338	0,348	0,161
IMAH2	0,530	0,272	0,441	0,223
IMAR5	0,450	0,800	0,380	0,197
IMAR2	0,650	0,319	0,342	0,172
IMAP5	0,580	0,292	0,436	0,189
IMAP2	0,640	0,299	0,446	0,252
$\bar{x}$	0,562	0,204	0,40	0,03
IMSR5	0,520	0,173	0,416	0,191
IMSR2	0,530	0,231	0,309	0,143
IMSH5	0,450	0,241	0,350	0,187
IMSH2	0,650	0,263	0,375	0,161
IMSP5	0,580	0,392	0,387	0,174
IMSP2	0,640	0,222	0,373	0,161
$\bar{x}$	0,562	0,074	0,37	0,02
PAR5	0,520	0,310	0,556	0,262
PAR2	0,530	0,377	0,361	0,148
PAH5	0,450	0,407	0,457	0,184
PAH2	0,650	0,330	0,399	0,181
PAP5	0,580	0,326	0,500	0,182
PAP2	0,640	0,491	0,536	0,223
$\bar{x}$	0,562	0,068	0,47	0,04
PAP	0,520	0,379	0,577	0,243
HAP	0,530	0,429	0,438	0,197
HSP	0,450	0,249	0,403	0,147
ISP	0,650	0,241	0,331	0,164
PSP	0,580	0,141	0,370	0,148
$\bar{x}$	0,549	0,137	0,43	0,07
PSP5	0,520	0,191	0,458	0,190
PSP2	0,530	0,175	0,465	0,178
PSH5	0,450	0,183	0,412	0,156
PSH2	0,650	0,160	0,409	0,149
PSR5	0,580	0,191	0,373	0,179
PSR2	0,640	0,182	0,402	0,151
$\bar{x}$	0,562	0,012	0,42	0,02

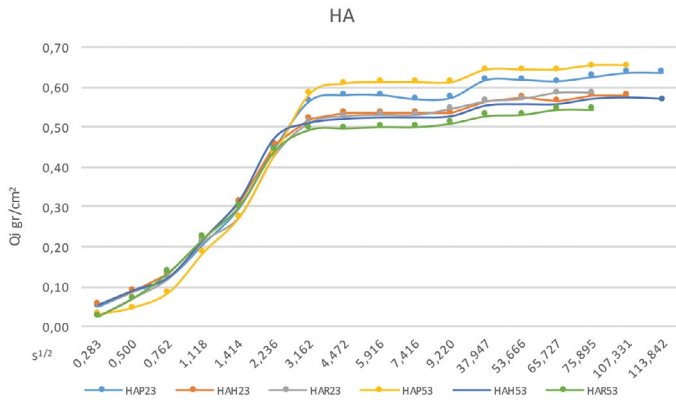


Grafico 5.56. Absorción de agua por capilaridad (gr/cm²) del grupo técnico HA.

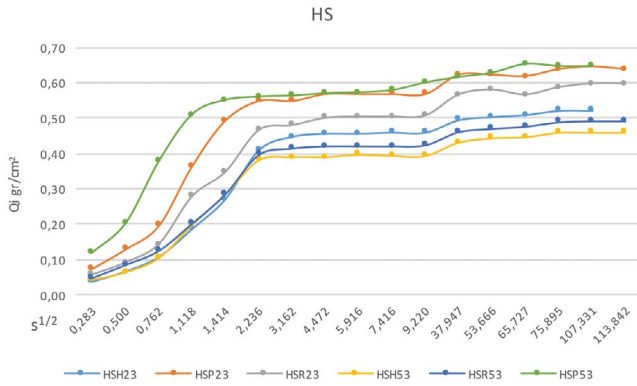


Grafico 5.57. Absorción de agua por capilaridad (gr/cm²) del grupo técnico HS.

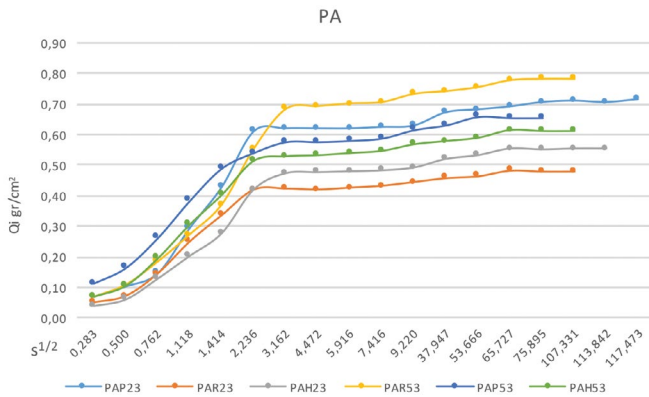


Grafico 5.58. Absorción de agua por capilaridad (gr/cm²) del grupo técnico PA.



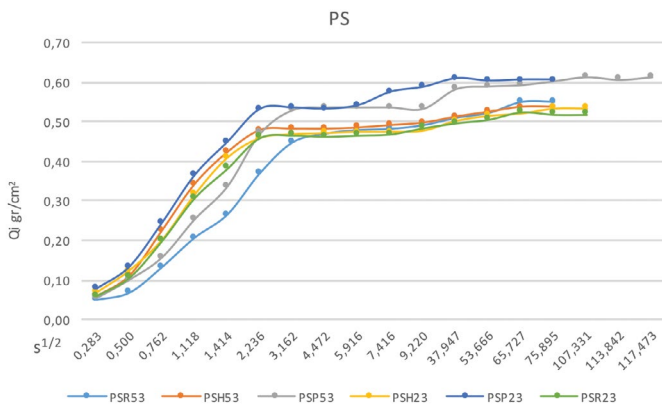


Grafico 5.59. Absorción de agua por capilaridad (gr/cm<sup>2</sup>) del grupo técnico PS.

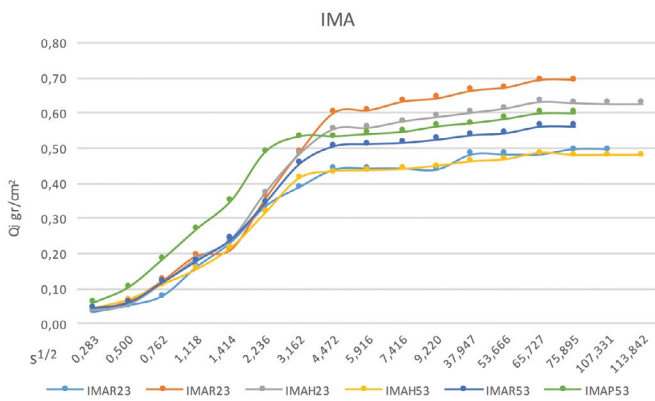


Grafico 5.60. Absorción de agua por capilaridad (gr/cm<sup>2</sup>) del grupo técnico IMA.

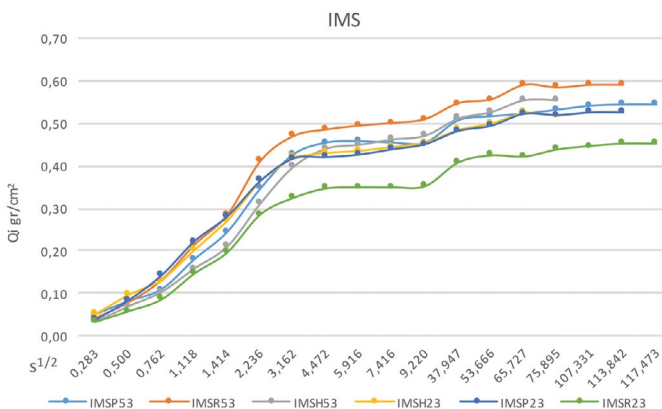


Grafico 5.61. Absorción de agua por capilaridad (gr/cm<sup>2</sup>) del grupo técnico IMS.

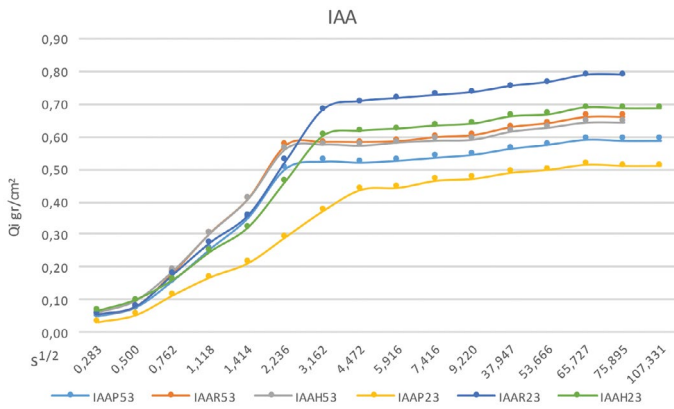


Gráfico 5.62. Absorción de agua por capilaridad (gr/cm<sup>2</sup>) del grupo técnico IAA.

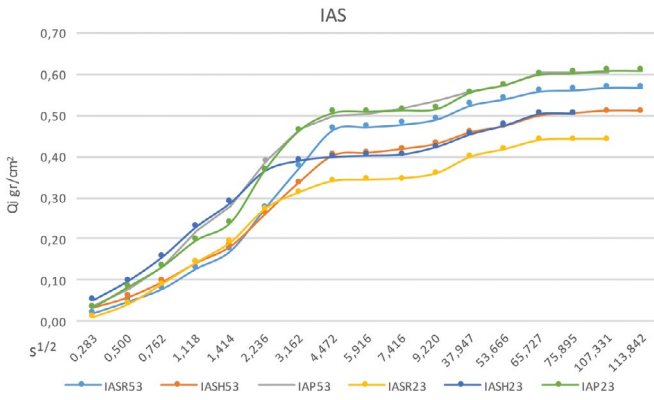


Gráfico 5.63. Absorción de agua por capilaridad (gr/cm<sup>2</sup>) del grupo técnico IAS.

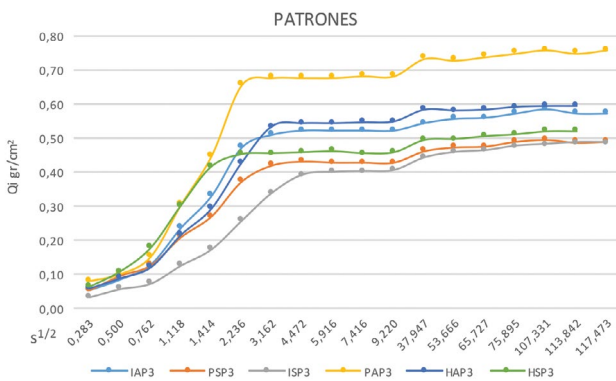


Gráfico 5.64. Absorción de agua por capilaridad (gr/cm<sup>2</sup>) de los morteros Patrones.

### *Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica de las probetas envejecidas*

El ensayo se ha realizado siguiendo la misma metodología que en el anterior ensayo (Punto 5.2.2). Las probetas empleadas han sido dos de las envejecidas en los ciclos de humedad y temperatura, de dimensiones 4x4x2 cm (Fig.5.49). El ensayo ha durado 8 días y se presentan los valores obtenidos en cada medición en la siguiente tabla (Tabla 5.17).



Fig. 5.49 Inicio del ensayo de absorción de agua a presión atmosférica de las probetas envejecidas.

Los resultados del ensayo muestran una absorción de agua menor en las probetas envejecidas con respecto a las probetas sin envejecer (punto 5.2.2). Los promedios de agua absorbida (Gráfico 5.65) son de 24,06% para el grupo IMS, 31,64% para IMA, 21,25 % para IAS, 32,94% para IAA, 33,67% para PA, 25,09% para PS, 34,68% para HA y 29,27% para el grupo HS. En relación a las probetas patrón se observa también una disminución de la absorción con respecto al ensayo previo sin envejecer. Todos los grupos disminuyen el porcentaje de agua absorbida excepto el grupo ISP, que muestra un rango bastante superior de agua absorbida (20,86% frente a 11,30% previo) con el mortero envejecido (Tabla 5.18).

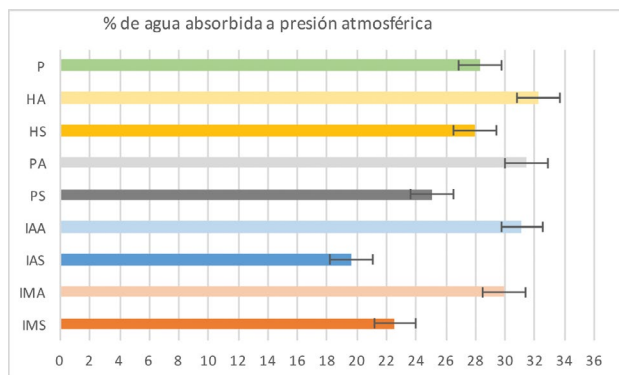


Gráfico 5.65. Porcentaje promedio de absorción de agua a presión atmosférica de las probetas envejecidas.

Tabla 5.17 Resultados de absorción (gr.) de cada tipo de mortero en cada tiempo estimado (desviación estándar entre paréntesis).

PROBETA	48h	62h	86h	134h	158h	182h	206h	230h
IMSP1	21,00(0,10)	21,39(0,59)	21,57(0,46)	21,69(0,52)	21,81(0,58)	21,85(0,64)	21,87(0,44)	21,91(0,55)
IMSP2	20,48(0,36)	20,72(0,36)	20,93(0,39)	21,19(0,37)	21,45(0,23)	21,43(0,37)	21,47(0,37)	21,51(0,43)
IMSR5	20,68(0,13)	21,06(0,20)	21,25(0,20)	21,63(0,27)	21,67(0,38)	21,75(0,38)	21,83(0,36)	21,87(0,37)
IMSR2	21,60(0,23)	21,91(0,45)	21,88(0,41)	22,26(0,40)	22,47(0,37)	22,33(0,50)	22,42(0,51)	22,47(0,53)
IMSH5	22,32(0,5)	22,59(0,5)	22,63(0,6)	22,97(0,4)	23,11(0,4)	23,08(0,5)	23,18(0,5)	23,24(0,5)
IMSH2	22,42(1,0)	22,59(0,9)	22,84(1,1)	23,10(1,1)	23,21(1,1)	23,21(1,0)	23,32(1,1)	23,45(1,1)
IMAR5	31,76(0,15)	32,13(0,06)	32,22(0,19)	32,44(0,03)	32,30(0,08)	32,33(0,03)	32,22(0,19)	32,36(0,17)
IMAR2	29,86(0,13)	30,11(0,12)	30,19(0,01)	30,54(0,0)	30,49(0,07)	30,44(0,0)	30,44(0,0)	30,54(0,0)
IMAP5	30,64(0,09)	30,73(0,14)	30,73(0,04)	31,01(0,0)	30,86(0,12)	30,80(0,21)	30,80(0,21)	30,59(0,0)
IMAP2	32,60(0,09)	32,82(0,03)	32,90(0,06)	33,14(0,01)	33,05(0,01)	33,20(0,0)	32,99(0,0)	33,09(0,06)
IMAH5	33,64(0,61)	33,83(0,45)	34,09(0,28)	34,32(0,50)	34,25(0,50)	34,48(0,28)	34,28(0,55)	34,05(0,0)
IMAH2	28,97(0,38)	29,28(0,37)	29,43(0,38)	29,78(0,38)	29,67(0,38)	29,70(0,38)	29,43(0,38)	29,43(0,38)
IASR5	18,67(0,40)	18,98(0,48)	19,13(0,38)	19,43(0,38)	19,56(0,36)	19,60(0,36)	19,58(0,44)	19,61(0,44)
IASR2	20,74(0,35)	21,03(0,19)	21,26(0,18)	21,58(0,18)	21,83(0,20)	21,81(0,11)	21,83(0,20)	21,94(0,23)
IASH5	19,95(0,18)	20,18(0,51)	20,20(0,16)	20,41(0,30)	20,52(0,25)	20,50(0,33)	20,47(0,33)	20,54(0,33)
IASH2	23,34(0,12)	23,60(0,10)	23,85(0,01)	24,36(0,30)	24,44(0,26)	24,28(0,33)	24,38(0,18)	24,49(0,19)
IASP2	20,53(0,44)	20,82(0,37)	21,05(0,33)	21,40(0,35)	21,52(0,23)	21,50(0,26)	21,56(0,23)	21,66(0,26)
IASP5	20,37(0,20)	20,58(0,39)	20,98(0,70)	21,10(0,41)	21,21(0,45)	21,26(0,43)	21,25(0,51)	21,29(0,57)
IAAH5	33,07(0,87)	33,41(0,80)	33,63(0,81)	33,96(0,81)	33,94(0,85)	34,02(0,81)	34,02(0,81)	33,97(1,21)
IAAH2	31,90(0,62)	32,21(0,69)	32,34(0,87)	32,80(0,87)	32,65(0,66)	32,78(0,91)	32,85(0,80)	33,01(0,80)
IAAP5	31,54(0,17)	31,91(0,22)	32,11(0,18)	32,53(0,01)	32,58(0,27)	32,47(0,15)	32,53(0,01)	32,56(0,03)
IAAP2	32,27(0,45)	32,62(0,65)	32,79(0,67)	33,07(0,55)	33,17(0,69)	33,12(0,76)	33,10(0,51)	33,15(0,58)
IAAR5	32,97(0,37)	33,18(0,59)	33,51(0,64)	33,81(0,48)	33,90(0,53)	33,73(0,78)	33,69(0,65)	33,76(0,74)
IAAR2	31,91(0,28)	32,23(0,20)	32,46(0,01)	32,76(0,26)	32,83(0,01)	32,84(0,28)	32,82(0,17)	32,85(0,13)
PSR5	23,81(0,15)	23,92(0,0)	24,28(0,06)	24,70(0,19)	24,70(0,19)	24,80(0,12)	25,17(0,12)	25,17(3,46)
PSR2	25,52(2,85)	25,73(2,86)	25,88(2,58)	26,45(2,31)	26,55(2,32)	26,42(2,35)	26,08(2,29)	26,24(2,45)
PSH5	24,38(1,19)	24,40(1,23)	24,75(1,09)	25,03(1,05)	25,29(1,04)	24,75(1,66)	24,75(1,52)	24,35(1,72)
PSH2	24,76(3,07)	25,26(2,96)	25,20(2,67)	26,07(2,54)	25,79(2,35)	25,84(2,35)	25,67(2,45)	25,66(2,16)
PSP5	24,18(1,06)	24,00(0,93)	24,26(0,87)	24,66(0,81)	24,79(0,99)	24,84(0,81)	24,82(0,96)	24,71(1,06)
PSP2	24,47(0,73)	24,72(0,56)	24,84(0,58)	25,54(0,53)	25,38(0,44)	25,32(0,28)	25,38(0,38)	25,34(0,31)
PAH5	32,90(3,21)	32,80(2,98)	32,89(2,93)	33,23(2,97)	32,96(2,76)	33,19(2,65)	32,84(2,69)	32,78(2,87)
PAH2	32,55(0,01)	32,59(0,22)	32,62(0,18)	33,25(0,34)	33,12(0,24)	33,10(0,85)	32,59(0,50)	32,46(0,50)
PAP5	33,03(1,58)	33,17(0,83)	33,68(0,86)	34,26(0,39)	33,95(0,65)	34,26(0,57)	33,98(0,51)	33,76(0,28)
PAP2	36,94(0,42)	36,37(1,23)	36,14(0,49)	36,59(0,83)	36,73(0,63)	36,38(0,44)	35,92(0,69)	35,23(0,51)
PAR5	31,48(0,84)	31,53(0,76)	31,53(0,53)	31,97(0,63)	31,87(0,78)	31,98(0,70)	31,75(0,46)	31,47(0,52)
PAP2	34,56(0,46)	34,36(0,30)	34,64(0,46)	34,72(0,57)	34,76(0,52)	34,60(0,41)	34,64(0,58)	34,20(0,19)
HSP5	29,92(0)	30,51(0)	30,45(0)	31,23(0)	31,23(0)	31,36(0)	31,36(0)	31,17(0)
HSP2	26,88(0,72)	27,19(0,97)	27,30(0,74)	28,62(1,05)	28,15(0,71)	28,23(0,83)	28,34(0,28)	28,17(0,68)
HSR5	28,19(0,36)	27,99(0,45)	28,44(0,59)	28,93(0,61)	29,02(0,66)	29,08(0,66)	29,20(0,49)	28,99(0,61)
HSH2	27,57(0,27)	27,82(0,09)	28,04(0,25)	29,23(0,05)	28,57(0,02)	28,52(0,01)	28,47(0,0)	28,42(0,07)
HSR5	27,63(1,62)	27,26(1,47)	27,39(1,36)	28,11(1,78)	28,22(1,63)	28,11(1,62)	28,07(1,42)	27,98(1,37)
HSR2	32,77(0,28)	32,74(0,71)	32,55(0,59)	31,98(1,14)	31,71(1,05)	31,58(1,25)	31,47(1,09)	31,23(0,95)
HAH5	33,03(0,49)	33,30(0,78)	33,48(0,62)	34,52(0,76)	33,47(0,53)	33,48(0,62)	33,45(0,75)	33,35(0,52)
HAH2	35,82(0,40)	35,79(0,10)	35,67(0,10)	36,09(0,35)	36,09(0,27)	36,06(0,03)	36,12(0,23)	36,09(0,18)
HAR5	35,82(0,40)	35,79(0,10)	35,67(0,10)	36,09(0,35)	36,09(0,27)	36,06(0,03)	36,12(0,23)	36,09(0,18)
HAR2	37,08(0,45)	36,35(1,13)	36,27(0,92)	36,55(1,07)	36,30(0,98)	35,95(0,82)	35,68(0,88)	35,70(1,17)
HAP5	32,24(0,32)	32,33(0,35)	32,30(0,48)	33,61(0,55)	32,67(0,27)	32,50(0,27)	32,53(0,15)	32,36(0,23)
HAP2	33,33(0,80)	33,75(0,36)	33,51(0,46)	34,54(0,97)	33,93(0,26)	33,95(0,30)	33,90(0,31)	33,87(0,27)
PSP	22,76(0,23)	23,05(0,08)	23,24(0,15)	23,63(0,07)	23,88(0,01)	23,71(0,24)	23,75(0,18)	23,87(0,22)
ISP	20,22(0,03)	20,45(0,14)	20,64(0,07)	20,95(0,02)	21,14(0,02)	21,06(0,02)	21,20(0,07)	21,22(0,09)
IAP	34,53(0,48)	35,11(0,49)	35,45(0,57)	35,86(0,58)	35,96(0,55)	35,77(0,46)	35,86(0,58)	35,96(0,44)
HSP	27,91(0,42)	30,83(4,15)	28,51(0,7)	28,91(0,50)	28,96(0,43)	28,93(0,32)	28,95(0,36)	28,98(0,40)
PAP	33,84(0,78)	34,36(0,66)	34,41(0,93)	34,59(0,80)	34,56(0,85)	34,58(0,69)	34,35(0,55)	34,15(0,94)
HAP	31,80(0,68)	32,04(0,66)	32,16(0,82)	32,29(0,86)	32,26(0,86)	32,18(0,86)	32,07(0,86)	32,04(0,86)

Tabla 5.18 Promedio de absorción de agua a presión atmosférica registrado antes y después de los ciclos de humedad y secado.

ABSORCIÓN DE AGUA A PRESIÓN ATMOSFÉRICA (PROMEDIO %)		
PROBETA	ANTES	DESPUÉS
IMAR5	34,02	30,53
IMAR2	33,40	28,10
IMAH5	37,22	31,79
IMAH2	31,41	28,46
IMAP5	35,03	29,20
IMAP2	35,14	31,49
$\bar{x}$	34,37	29,93
$\delta$	1,95	1,57
IAAR5	37,66	32,023
IAAR2	35,10	31,224
IAAH5	36,79	31,487
IAAH2	32,98	30,616
IAAP5	35,25	30,721
IAAP2	34,27	30,782
$\bar{x}$	35,34	31,14
$\delta$	1,69	0,54
IMSH2	25,52	23,651
IMSH5	24,44	23,723
IMSP2	22,38	21,810
IMSP5	22,25	22,251
IMSR2	23,62	22,364
IMSR5	29,64	21,635
$\bar{x}$	24,64	22,57
$\delta$	2,74	0,90
IASH2	30,22	23,377
IASH5	21,79	20,836
IASP2	22,38	21,469
IASP5	22,35	21,856
IASR2	26,95	21,397
IASR5	19,42	8,687
$\bar{x}$	23,85	19,60
$\delta$	3,96	5,42
PSP5	22,67	23,73
PSP2	26,40	25,15
PSH5	25,14	25,02
PSH2	25,16	26,45
PSR5	25,19	23,41
PSR2	26,13	26,83
$\bar{x}$	25,11	25,10
$\delta$	1,31	1,38
PAP5	37,31	32,18
PAP2	71,92	33,41
PAH5	37,10	29,26
PAH2	35,27	30,64
PAR5	35,33	30,53
PAR2	37,33	32,40
$\bar{x}$	42,38	31,40
$\delta$	14,50	1,52
HSP5	32,80	29,16
HSP2	30,09	27,27
HSR5	31,13	27,62
HSR2	30,82	27,90
HSR5	30,57	25,89
HSR2	34,68	29,77
$\bar{x}$	31,68	27,93
$\delta$	1,74	1,39
HAP51	32,44	30,69
HAP21	36,53	31,62
HAH51	36,86	31,84
HAH21	42,35	33,96
HAR51	35,57	31,05
HAR21	39,29	34,16
$\bar{x}$	37,17	32,22
$\delta$	3,37	1,48
HAP	35,91	30,25
PAP	39,27	27,99
HSP	31,83	33,64
PSP	26,36	23,45
ISP	11,30	21,49
IAP	36,54	33,29
$\bar{x}$	30,20	28,35
$\delta$	10,29	5,04

### *Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de las probetas envejecidas*

El ensayo se ha realizado empleando la metodología descrita en el punto (5.2.3). Para determinar la permeabilidad al vapor de agua se someten a ensayo dos probetas circulares envejecidas en los ciclos de humedad y secado, de 4cm Ø X 1 cm. La metodología de ensayo seguida es análoga a la empleada anteriormente (punto), determinándose la variación de la masa acumulada ( $\Delta m_i$ ), la densidad del caudal de vapor de agua en  $\text{gr}/(\text{cm}^2.\text{s})$ , y la permeabilidad del vapor de agua en  $\text{gr}/(\text{cm}^2.\text{s}.\text{Pa})$  (Fig.5.50).

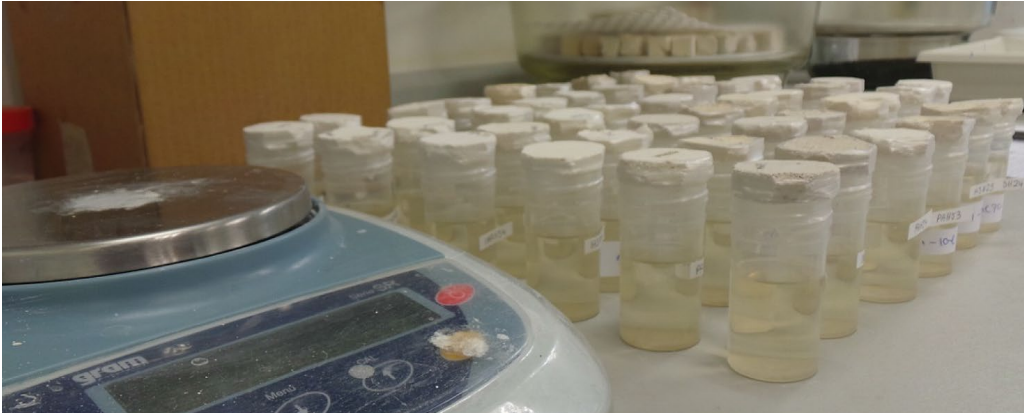


Fig. 5.50 Permeabilidad al vapor de agua de las probetas envejecidas.

El coeficiente de permeabilidad corresponde a la dificultad que tienen las moléculas de vapor de agua a pasar a través del mortero; por ello cuanto menor sea el coeficiente, mayor será la permeabilidad (Izaguirre *et.al* 2011). Los datos obtenidos del ensayo se detallan en la Tabla 5.19, revelándose un aumento generalizado en la transpiración de los morteros estudiados, en comparación con los datos obtenidos de los morteros sin envejecer (5.2.3). Todos los coeficientes de permeabilidad ( $\delta_p$ ) son considerablemente más bajos, de entre los que destacan los morteros PSR2 (-5,13E-13 antes; -2,20E-13 después del envejecimiento) y IAAR2 (-4,23E-13 antes; -1,81E-13 después del envejecimiento) (Tabla 5.20).

Tabla 5.19 Determinación de la permeabilidad al vapor de agua tras ciclos de humedad y secado.  $\Delta m_i$  (%) en gr; caudal del vapor de agua a través de la probeta (G) en  $\text{gr}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$  y permeabilidad al vapor de agua ( $\delta_p$ ) en  $\text{gr}/(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$ . Desviación estándar ( $\delta$ ) en la segunda columna.

PROBETA	$\Delta m_i$ (gr. %) ( $\delta$ )		G ( $\text{gr}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$ ) ( $\delta$ )		$\delta_p$ $\text{gr}/(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$ ( $\delta$ )	
IASP2	-1,403	0,220	-2,45E-06	2,26E-07	-1,93E-13	3,06E-14
IASP5	-1,387	0,173	-2,64E-06	5,07E-01	-2,08E-13	6,77E-14
IASR2	-1,433	0,101	-2,70E-06	6,30E-01	-1,91E-13	6,75E-14
IASR5	-1,393	0,098	-2,64E-06	1,58E-01	-1,87E-13	7,88E-14
IASH2	-1,439	0,116	-2,81E-06	8,05E-02	-2,43E-13	8,80E-14
IASH5	-1,260	0,306	-2,10E-06	8,19E-02	-1,82E-13	4,73E-14
IAAH2	-0,740	0,044	-2,07E-06	2,98E-02	-1,79E-13	5,03E-14
IAAH5	-0,953	0,075	-2,74E-06	5,62E-02	-1,94E-13	5,72E-14
IAAR2	-0,751	0,068	-2,09E-06	3,75E-02	-1,81E-13	4,77E-14
IAAR5	-1,118	0,098	-3,33E-06	1,57E-01	-3,14E-13	1,14E-13
IAAP2	-0,827	0,261	-2,50E-06	1,14E-01	-1,97E-13	7,64E-14
IAAP5	-0,990	0,050	-2,85E-06	5,14E-02	-2,24E-13	6,87E-14
IMSR2	-0,687	0,049	-1,88E-06	2,73E-02	-1,48E-13	3,65E-14
IMSR5	-0,957	0,154	-2,89E-06	2,65E-01	-2,27E-13	8,47E-14
IMSP2	-0,774	0,263	-2,18E-06	3,38E-02	-1,71E-13	4,71E-14
IMSP5	-0,842	0,374	-2,44E-06	2,63E-01	-2,11E-13	6,42E-14
IMSR2	-0,826	0,160	-2,25E-06	8,72E-03	-2,12E-13	5,22E-14
IMSR5	-0,957	0,273	-2,14E-06	3,25E-01	-2,02E-13	7,59E-14
IMAH2	-0,6828	0,015	-1,97E-06	6,16E-02	-1,86E-13	5,66E-14
IMAH5	-0,8545	0,007	-2,37E-06	1,03E-01	-1,87E-13	5,18E-14
IMAP2	-0,7527	0,376	-2,30E-06	1,71E-01	-1,81E-13	7,10E-14
IMAP5	-1,1124	0,022	-3,44E-06	8,72E-02	-2,44E-13	1,03E-13
IMAR2	-0,9224	0,239	-2,80E-06	1,06E-01	-1,98E-13	7,73E-14
IMAR5	-0,6612	0,016	-1,73E-06	5,58E-02	-1,23E-13	2,53E-14
PSH2	-0,6102	0,367	-1,67E-06	5,98E-02	-1,31E-13	3,29E-14
PSH5	-0,9090	0,062	-2,60E-06	3,70E-02	-2,04E-13	4,42E-14
PSP2	-0,9345	0,061	-2,69E-06	3,74E-02	-2,12E-13	4,62E-14
PSP5	-1,1226	0,032	-3,17E-06	5,01E-02	-2,25E-13	3,77E-14
PSR2	-1,0398	0,071	-3,12E-06	5,32E-02	-2,20E-13	6,44E-14
PSR5	-0,9493	0,163	-2,69E-06	9,55E-02	-1,90E-13	3,72E-14
PAH2	-1,238	0,091	-3,69E-06	2,41E-02	-2,90E-13	9,88E-14
PAH5	-1,298	0,220	-4,03E-06	1,56E-01	-3,17E-13	1,08E-13
PAR2	-1,314	0,000	-4,36E-06	2,45E-06	-3,43E-13	1,93E-13
PAR5	-0,848	0,081	-2,37E-06	1,31E-01	-1,68E-13	4,85E-14
PAP2	-0,923	0,000	-2,63E-06	8,39E-07	-1,86E-13	5,94E-14
PAP5	-0,928	0,000	-2,55E-06	6,43E-07	-1,80E-13	4,55E-14
HSP2	-1,328	0,261	-4,05E-06	6,46E-07	-3,18E-13	1,05E-13
HSP5	-0,994	0,270	-2,95E-06	7,33E-01	-2,32E-13	8,93E-14
HSH2	-0,999	0,050	-2,79E-06	2,77E-02	-2,41E-13	3,40E-14
HSH5	-1,164	0,099	-3,52E-06	1,01E-01	-3,05E-13	1,01E-13
HSR2	-1,107	0,000	-3,51E-06	1,72E-06	-2,76E-13	1,36E-13
HSR5	-0,771	0,000	-2,24E-06	7,41E-07	-1,76E-13	5,83E-14
HAP2	-0,843	0,048	-2,46E-06	3,52E-02	-2,32E-13	6,48E-14
HAP5	-1,159	0,078	-3,30E-06	7,66E-02	-2,60E-13	6,94E-14
HAH2	-1,054	0,000	-3,24E-06	1,31E-06	-2,54E-13	1,04E-13
HAH5	-1,014	0,000	-2,97E-06	9,51E-07	-2,33E-13	7,48E-14
HAR2	-0,780	0,000	-2,22E-06	6,24E-07	-1,57E-13	4,42E-14
HAR5	-0,843	0,028	-2,38E-06	5,87E-02	-1,68E-13	4,52E-14
ISP	-0,657	0,126	-1,79E-06	6,75E-02	-1,27E-13	2,80E-14
PSP	-0,737	0,090	-1,96E-06	5,77E-02	-1,38E-13	3,02E-14
HAP	-0,672	0,122	-1,80E-06	8,25E-02	-1,42E-13	2,98E-14
HSP	-0,868	0,067	-2,49E-06	7,43E-02	-1,95E-13	6,16E-14
IAP	-1,039	0,167	-2,30E-06	1,10E-06	-1,99E-13	5,89E-14
PAP	-0,808	0,000	-3,10E-06	6,35E-07	-2,44E-13	8,67E-14

En los gráficos resultantes del cálculo de la permeabilidad al vapor de agua ( $\text{gr}/\text{cm}^2 \cdot \text{s.P}$ ), se observa un comportamiento similar en la mayoría de grupos técnicos con tendencia a estabilizarse a partir de la segunda medida de tiempo. Esto ocurre de forma más acusada en los grupos técnicos realizados con cal apagada por inmersión IAS, IAA, IMS e IMA (Gráfico 5.66-5.69), que manifiestan una transpiración muy similar en todas sus variantes. Los grupos PS, PA, HS y HA (Gráficos 5.70-5.73) presentan una permeabilidad más irregular, si bien también tienden a estabilizarse hacia las últimas medidas del ensayo.

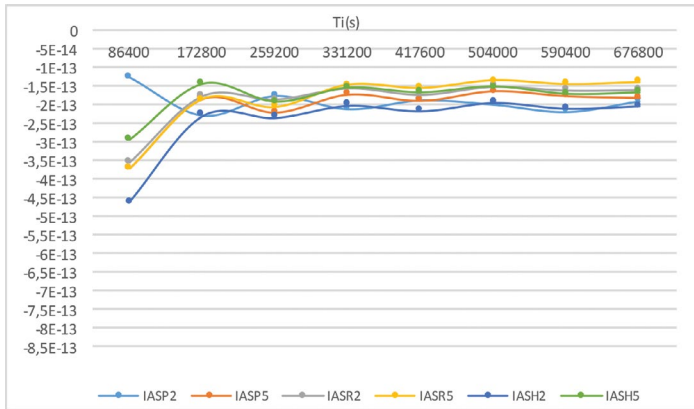


Gráfico 5.66. Permeabilidad al vapor de agua ( $\text{gr}/\text{cm}^2 \cdot \text{s.P}$ ) del grupo IAA.

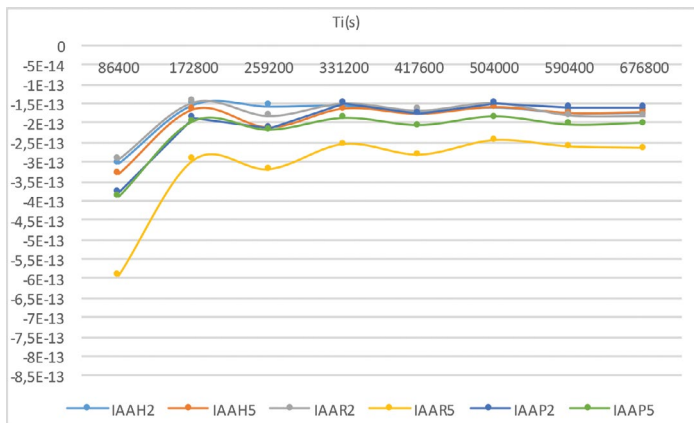


Gráfico 5.67. Permeabilidad al vapor de agua ( $\text{gr}/\text{cm}^2 \cdot \text{s.P}$ ) del grupo IAA.



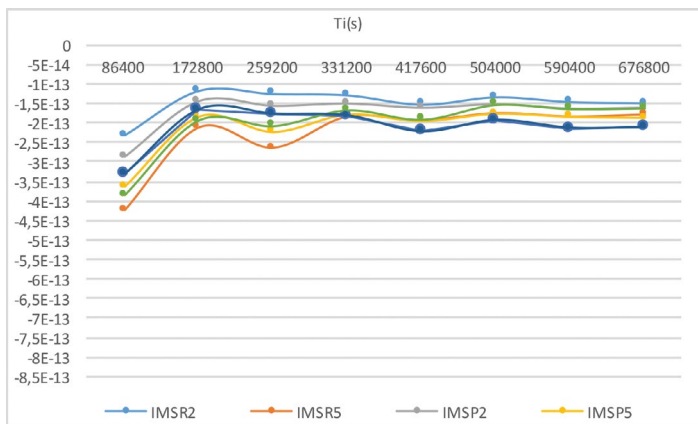


Gráfico 5.68. Permeabilidad al vapor de agua (gr/cm<sup>2</sup>.s.P) del grupo IMS.

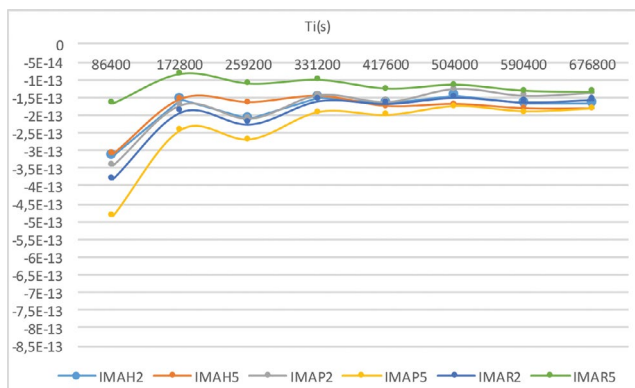


Gráfico 5.69. Permeabilidad al vapor de agua (gr/cm<sup>2</sup>.s.P) del grupo IMA.

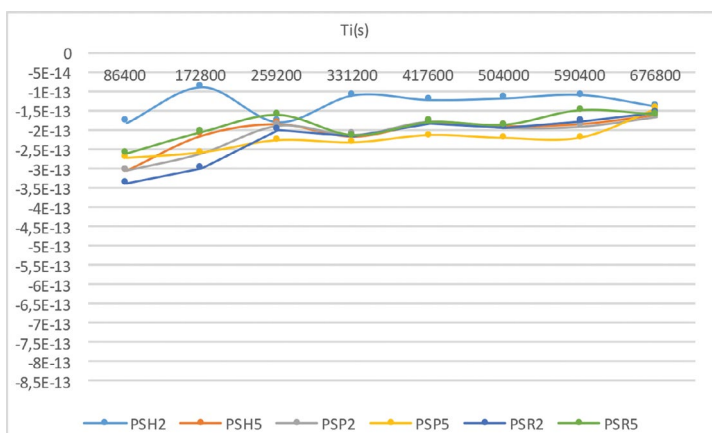


Gráfico 5.70. Permeabilidad al vapor de agua (gr/cm<sup>2</sup>.s.P) del grupo PS.

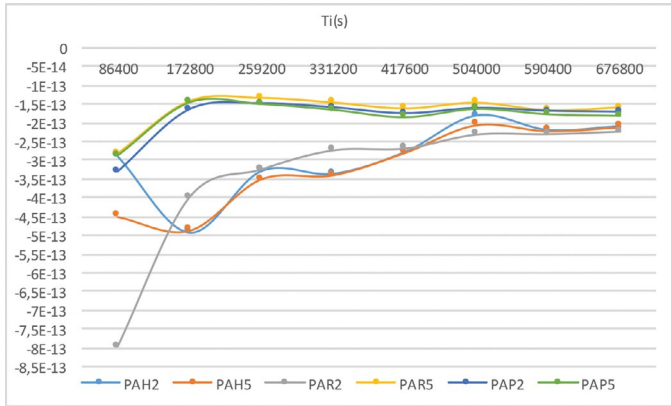


Gráfico 5.71. Permeabilidad al vapor de agua ( $gr/cm^2.s.P$ ) del grupo PA.

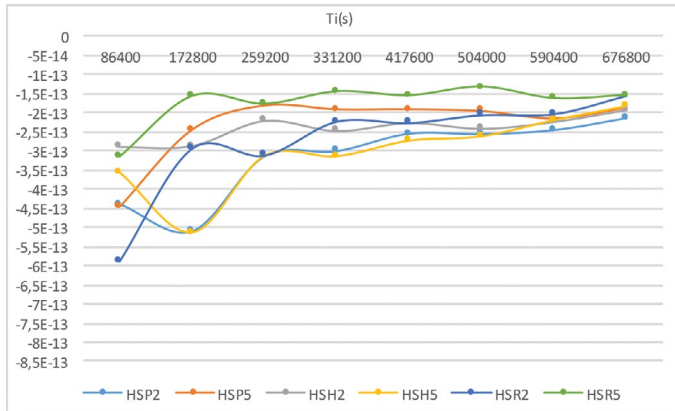


Gráfico 5.72. Permeabilidad al vapor de agua ( $gr/cm^2.s.P$ ) del grupo HS.

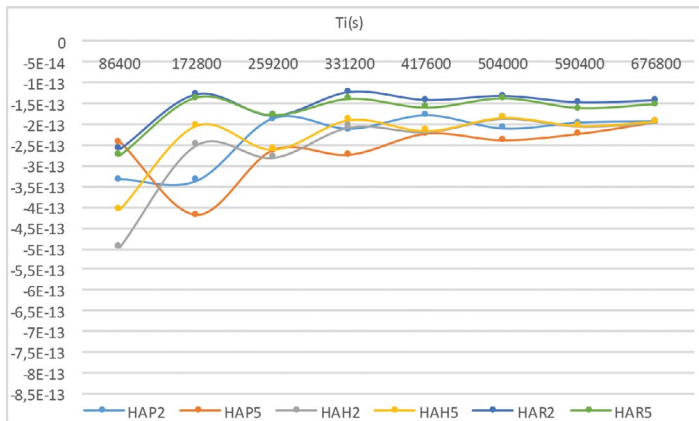


Gráfico 5.73. Permeabilidad al vapor de agua ( $gr/cm^2.s.P$ ) del grupo HA.

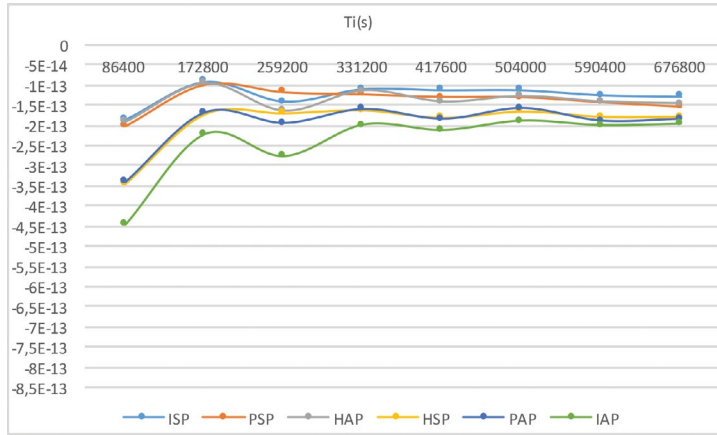


Gráfico 5.74. Permeabilidad al vapor de agua ( $\text{gr}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{P}$ ) del grupo de probetas patrón.

Tabla 5.20 Permeabilidad de las probetas (gr/(cm.s.Pa) antes y después del envejecimiento por ciclos de humedad y secado (desviación estándar en la segunda columna).

PROBETA	ANTES ENVEJECIMIENTO		DESPUÉS ENVEJECIMIENTO	
	$\delta_p$	gr/(cm.s.Pa)( $\delta$ )	$\delta_p$	gr/(cm.s.Pa) ( $\delta$ )
IMAP2	-3,68E-13	7,35E-14	-1,81E-13	7,10E-14
IMAH2	-3,58E-13	8,09E-14	-1,86E-13	5,66E-14
IMAR2	-3,78E-13	6,89E-14	-1,98E-13	7,73E-14
IMAP5	-1,80E-13	2,41E-14	-2,44E-13	1,03E-13
IMAR5	-2,04E-13	2,82E-14	-1,23E-13	2,53E-14
IMAH5	-1,99E-13	6,39E-14	-1,87E-13	5,18E-14
IMSP5	-2,73E-13	4,47E-14	-2,11E-13	6,42E-14
IMSP2	-2,93E-13	2,49E-14	-1,71E-13	4,71E-14
IMSR5	-2,47E-13	2,42E-14	-2,27E-13	8,47E-14
IMSR2	-2,66E-13	2,93E-14	-1,48E-13	3,65E-14
IMSH5	-2,34E-13	2,73E-14	-2,02E-13	7,59E-14
IMSH2	-2,91E-13	3,13E-14	-2,12E-13	5,22E-14
IAAH5	-2,39E-13	3,09E-14	-1,94E-13	5,72E-14
IAAP5	-2,81E-13	3,70E-14	-2,24E-13	6,87E-14
IAAR5	-1,82E-13	2,79E-14	-3,14E-13	1,14E-13
IAAH2	-3,49E-13	7,27E-14	-1,79E-13	5,03E-14
IAAR2	-4,23E-13	9,46E-14	-1,81E-13	4,77E-14
IASP5	-2,40E-13	3,21E-14	-2,08E-13	6,77E-14
IASP2	-2,46E-13	2,92E-14	-1,93E-13	3,06E-14
IASR5	-2,10E-13	2,95E-14	-1,87E-13	7,88E-14
IASR2	-2,75E-13	3,21E-14	-1,91E-13	6,75E-14
IASH5	-2,53E-13	2,71E-14	-1,82E-13	4,73E-14
IASH2	-2,81E-13	3,35E-14	-2,43E-13	8,80E-14
PSP5	-3,93E-13	1,21E-13	-2,25E-13	3,77E-14
PSP2	-2,35E-13	5,34E-14	-2,12E-13	4,62E-14
PSR5	-3,80E-13	1,42E-13	-1,90E-13	3,72E-14
PSR2	-5,13E-13	1,82E-13	-2,20E-13	6,44E-14
PSH5	-2,03E-12	1,26E-12	-2,04E-13	4,42E-14
PSH2	-1,45E-12	8,08E-13	-1,31E-13	3,29E-14
PAH5	-2,17E-13	5,21E-14	-3,17E-13	1,08E-13
PAH2	-2,35E-13	3,00E-14	-2,90E-13	9,88E-14
PAP5	-1,96E-13	2,29E-14	-1,80E-13	4,55E-14
PAR5	-2,03E-13	2,57E-14	-1,68E-13	4,85E-14
PAR2	-2,02E-13	2,86E-14	-3,43E-13	1,93E-13
HSR5	-2,32E-13	2,97E-14	-1,76E-13	5,83E-14
HSR2	-2,24E-13	5,08E-14	-2,76E-13	1,36E-13
HSP5	-1,78E-08	1,01E-08	-2,32E-13	8,93E-14
HSP2	-1,79E-13	2,36E-14	-3,18E-13	1,05E-13
HSH2	-1,92E-13	3,01E-14	-2,41E-13	3,40E-14
HSH5	-1,78E-13	5,84E-14	-3,05E-13	1,01E-13
HAP5	-2,10E-13	2,95E-14	-2,60E-13	6,94E-14
HAP2	-1,72E-13	2,42E-14	-2,32E-13	6,48E-14
HAH2	-1,87E-13	2,37E-14	-2,54E-13	1,04E-13
HAR5	-1,92E-13	2,45E-14	-1,68E-13	4,52E-14
HAR2	-2,02E-13	3,09E-14	-1,57E-13	4,42E-14
HSP	-2,16E-13	2,76E-14	-1,95E-13	6,16E-14
HAP	-2,19E-13	2,80E-14	-1,42E-13	2,98E-14
PSP	-1,19E-12	6,19E-13	-1,38E-13	3,02E-14
ISP	-2,31E-13	2,94E-14	-1,27E-13	2,80E-14
IAP	-4,88E-13	1,06E-13	-1,99E-13	5,89E-14
PAP	-2,13E-13	2,92E-14	-2,44E-13	8,67E-14

Del ensayo determinante de la permeabilidad al vapor de agua de las probetas envejecidas se puede concluir que:

- o El ensayo de envejecimiento acelerado mediante ciclos de humidificación y secado ha producido cambios físicos en la estructura del mortero, provocando el aumento de la permeabilidad con respecto a los valores obtenidos en el ensayo realizado antes del envejecimiento acelerado (Tabla 5.20). Este hecho puede deberse al deterioro y disolución interna de partículas (como se ha comprobado con el cálculo de la variación de masa, punto 5.4.3.2), incrementando la porosidad y el acceso y circulación del vapor de agua.
- o Además del incremento de la permeabilidad, el flujo de vapor de agua se ha estabilizado, siendo más regular tras el envejecimiento.
- o Todos los grupos técnicos presentan coeficientes similares, si bien hay que resaltar el comportamiento homogéneo de los grupos realizados mediante cal apagada por inmersión (IAA-IAS, IMA-IMS).
- o Los coeficientes de las probetas patrón, son levemente más bajos que sus grupos homólogos realizados con aditivos orgánicos, por lo que aunque la adición de los exudados disminuye la transferencia de vapor, no podría decirse que modifican significativamente la permeabilidad al vapor de agua de los morteros.
- o El hecho de que los morteros sigan presentando buena permeabilidad tras los envejecimientos es muy importante teniendo en cuenta la futura ubicación. De lo contrario, se acelerarían los procesos de deterioro al acumularse la humedad por una traspiración insuficiente; desencadenando daños tanto en los morteros de reintegración como en los estucos originales y en el soporte pétreo.

### 5.4.5 Determinación de la estabilidad frente a la degradación natural

Como se describió anteriormente, paralelo a los ensayos de envejecimiento en laboratorio, también se ha realizado un estudio de envejecimiento natural de los morteros con el objetivo de observar su comportamiento en el lugar y las condiciones ambientales reales.

En 2011 se expusieron las primeras probetas de mortero en forma de cubo de 4x4x4 cm, pero fueron sustraídas, habiendo desaparecido todo el conjunto para la campaña siguiente (Fig.5.51). Por ello se decidió modificar el sistema de exposición, aplicando el mortero fresco sobre el muro. Los diferentes morteros estudiados han sido elaborados entre 2013 y 2016. Para el control del deterioro se han empleado métodos físicos de examen, como el control de la penetrabilidad de agua.



Fig. 5.51 Probetas exentas correspondientes a los grupos IMA e IAA, realizadas en la campaña de 2011.

#### 5.4.5.1 Condiciones de exposición

Los morteros han sido realizados en el laboratorio de Flores, Petén, envasados y aplicados posteriormente en un periodo de  $12 \pm 2$  h en el sitio La Blanca. El lugar de exposición seleccionado es el muro norte del cuarto 6J1-4, que aunque fue reconstruido arquitectónicamente, está constituido por sillares originales degradados. Aunque los morteros han sido aplicados en diferentes campañas, siempre han correspondido a estaciones secas, registrándose (*data logger* SCORT RH iLog©) unas condiciones ambientales muy similares (Tabla 5.21). El tamaño de las probetas es de  $\pm 4 \times 5$  cm, con un grosor aproximado de 5mm. La aplicación fue mediante espátula metálica, y el fratasado se realizó con la ayuda de una semilla de corozo, hasta dejar las superficies lisas y homogéneas para evitar la aparición de grietas (Fig. 5.52 y 5.53).

Tabla 5.21 Condiciones ambientales medias durante la elaboración de las probetas.

Grupo técnico	Campaña	Mes	Estación	HR %	T °C
IMS2-IMA2, IAS2-IAA2	2013	Noviembre	seca	95	24
PS-PA	2015	Febrero	seca	95,1	24,1
HS-HA, IMS5-IMA5, IAS5-IAA5	2016	Abril	seca	94,2	25



Fig. 5.52 y 5.53 Aplicación de los morteros correspondientes a la campaña de 2013.

#### 5.4.5.2 Evaluación de los cambios físicos por inspección visual

El primer método empleado para determinar daños en la superficie de los morteros tras un determinado tiempo, ha sido la inspección visual y el registro fotográfico con escala de color. De este modo, se han podido comprobar los cambios más importantes a nivel físico, como fisuras, roturas, manchas, erosión o el desprendimiento de las probetas.



Fig. 5.54 Probetas IMS, IMA, IAS, IAA, aplicadas en la campaña 2013.





Fig. 5.55 Probetas del grupo técnico PS, aplicadas en la campaña de 2015.



Fig. 5.56 Probetas aplicadas en 2013. Estado de conservación en la campaña de 2016.





Fig. 5.57 probetas aplicadas en 2015. Estado de conservación en la campaña de trabajo de 2016.

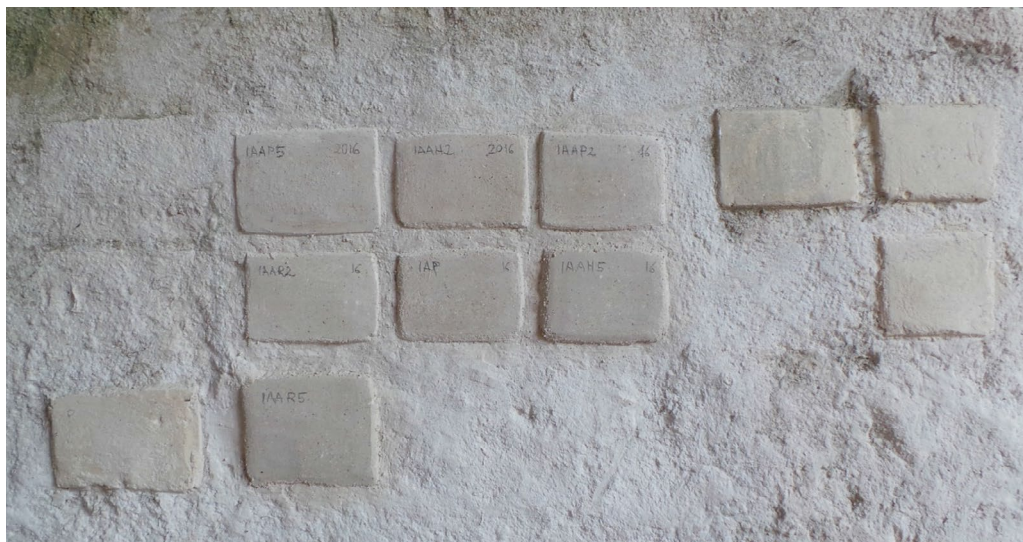


Fig. 5.58 Probetas aplicadas en la campaña de 2016, utilizando el espacio de las probetas de 2015 desprendidas.



Fig. 5.59 Probetas aplicadas en 2016. Estado de conservación en la campaña de 2018.



Fig. 5.60 Probetas aplicadas en 2013. Estado de conservación en la campaña de 2018.

De la observación de las probetas expuestas en las sucesivas campañas de trabajo en el sitio La Blanca, se puede deducir que:

- o Los grupos técnicos IMS e IAS expuestos desde 2013, han resistido hasta 2017, conservándose en buen estado con muy pocos signos de deterioro (Fig. 5.54 y 5.56). Muestran muy buena adhesión al soporte, soportado perfectamente la tracción durante el ensayo de penetración de agua en 2016. Durante el ensayo realizado en 2017, algunas probetas se desprendieron (IASR5,IMSH5,IASH2, IMAP5, IMSP2 e IASP2), quedando intactas IMSR2, IASH5, IASR2, IMSH2, IASP5 e ISP(patrón)(Fig.5.60). De lo que se deduce que este grupo realizado con cal apagada por inmersión y *Sascab*, produce una pasta fina y densa que se adhiere perfectamente al soporte. La adición de los exudados orgánicos(tipo de corteza, porcentaje y modo de adición al mortero) no parece influir en la durabilidad de las probetas; prueba de ello es que la probeta patrón (ISP) se encuentra entre las conservadas.
- o El grupo PS aplicado en 2015, ha demostrado muy poco poder de adhesión al soporte, independientemente del tipo de exudado y porcentaje de éste que contenga. Algunas probetas se desprendieron en el transcurso del primer año de exposición (PSR2 y PSR5), y otras se desprendieron durante el ensayo de penetración de agua (PSP2, PSP5, PSH5, PSH2)(Fig.5.55 y 5.57). Únicamente se mantiene en buen estado hasta 2018 la probeta patrón (PSP).
- o Se observa claramente una resistencia y durabilidad muy superior de las probetas realizadas con *Sascab* y cal apagada por inmersión(con agua IAS, o con el agua de maceración IMS), frente a los otros grupos técnicos, cuya pasta en fresco ya se advierte heterogénea y con menor poder adhesivo. Las conclusiones de este ensayo de degradación natural serán muy útiles para la consideración y selección final del mortero a emplear en la reintegración de los estucos de La Blanca.

#### 5.4.5.3 Evaluación de los cambios en el comportamiento hídrico mediante ensayo de penetración de agua

Un método sencillo de medir el comportamiento hídrico de los diferentes morteros aplicados *in situ* es el ensayo de penetración de agua. De este modo, teniendo como referencia las medidas iniciales, y realizando mediciones en las sucesivas campañas, se pueden determinar factores de deterioro como la erosión superficial, o la aparición de grietas y fisuras, que implicarían un aumento de la absorción. Por ahora sólo ha sido posible realizar este ensayo en dos ocasiones (2016 y 2017), aunque se espera poder obtener más datos para ayudar a determinar el mortero más adecuado. Para ello, en ambas ocasiones se ha empleado la pipeta *Karsten* y el procedimiento es idéntico al descrito en el punto (Fig. 5.61 y 5.62).





Fig. 5.61 y 5.62 Ensayos de penetración de agua realizados en 2017 sobre las probetas conservadas. Foto B. Carrascosa.

Durante la realización del ensayo se han desprendido las probetas del grupo PS (2015), debido a la fuerza de tracción que ejerce la pipeta al ser retirada de la superficie de la probeta, quedando únicamente adherida la probeta patrón de este grupo. De igual modo, las probetas aplicadas en 2016 también se han desprendido durante el ensayo, no pudiéndose determinar las mediciones.

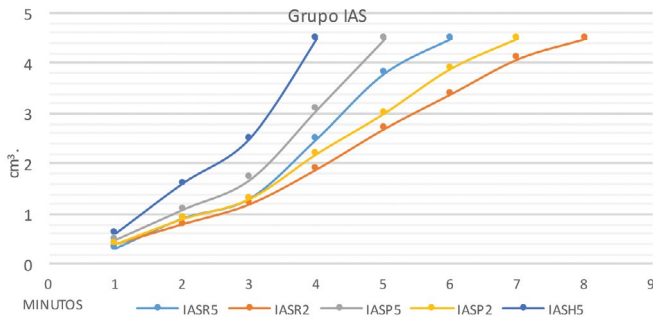


Gráfico. 5.75 Curvas de absorción de las probetas del grupo IAS, aplicadas en 2013.

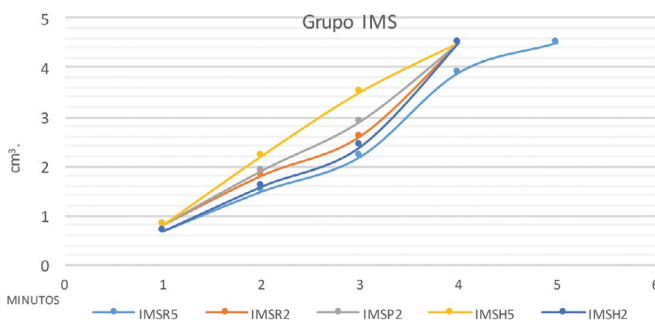


Gráfico 5.76. Curvas de absorción de agua del grupo IMS, aplicado en 2013.

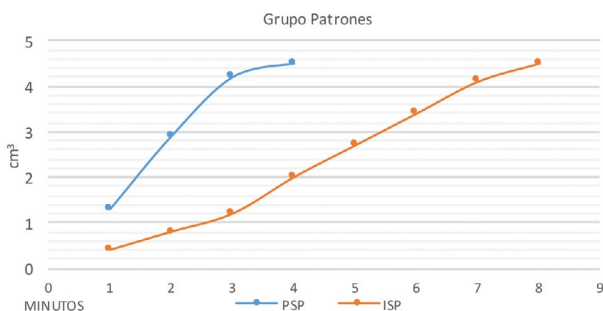


Gráfico 5.77. Curvas de absorción de agua de los grupos patrones PSP y ISP, aplicados en 2015 y 2013.

Los resultados que se han podido obtener en la segunda medición muestra unos patrones muy similares a la primera medición, aunque esta vez no se produce una absorción más lenta de las probetas IASP2, IASR5, IMSP2 e IMSR5. La absorción total del agua se crea entre los 10 y los 30 minutos. Los cálculos de absorción de agua en  $\text{cm}^3$  a los 5 minutos del ensayo (Gráfico 5.78), muestran poca diferencia entre la primera medición y la segunda, aunque se observa un ligero incremento en algunas probetas (PSP, IMSR5, IMSP2, IMSH5, ISP), y un descenso en la absorción en otras (IMSR2, IMSH2, IASR5, IASR2, IASP5, IASP2, IASH5). El aumento podría deberse a una mayor porosidad en superficie, debido al intemperismo, produciéndose erosión o microfisuras en la superficie (Lorenzo y Carrascosa 2017).

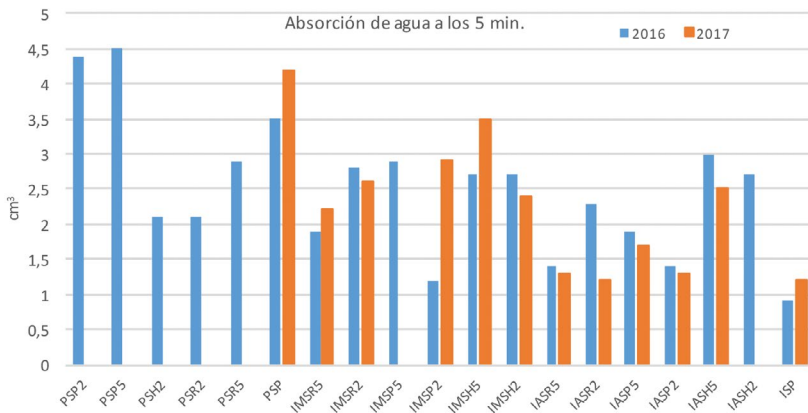


Gráfico 5.78. Comparación de las mediciones realizadas en 2016 y 2017.

De los grupos de probetas ensayados, los morteros realizados con cal apagada por pudrición (PS) no presentan buenos resultados de absorción ya que es excesivamente rápida. Además han presentado una adhesión insuficiente al soporte, al no resistir la tracción ejercida por la pipeta al ser retirada. De los morteros realizados con cal apagada por inmersión (IMS-IAS), destacan ligeramente los del grupo IMS, con una absorción gradual y moderada; por lo que estos morteros, especialmente los realizados con Pixoy al 2% (IMSP2) y con Ramón al 0,5% (IMSR5), manifiestan buena durabilidad, con una resistencia alta a la adhesión y al deterioro superficial (*ibíd.*).

#### 5.4.6 Conclusiones sobre la estabilidad de los morteros frente a agentes de degradación

De los resultados de los ensayos de durabilidad realizados en cada grupo de morteros se puede concluir que:

- o Los diferentes morteros estudiados presentan una resistencia media a la cristalización de sales, dado que el ensayo, indicado para piedra natural, supone una agresión muy fuerte para morteros de cal aérea. A pesar de ello, la media de durabilidad se sitúa entre los 4 y los 6 ciclos soportados. Como excepción, de los grupos IAA-IMA (realizados con la cal apagada por inmersión, tanto en agua corriente como en el agua de las maceraciones y con arena blanca), las variantes realizadas con el mayor porcentaje de aditivo orgánico (2%), han mostrado una resistencia significativamente mayor.
- o Todos los morteros presentan buena estabilidad frente a los cambios de temperatura como se ha podido comprobar en el ensayo de choque térmico, donde la variación de la masa tras el ensayo es muy similar en todas las variantes.

- o La estabilidad cromática que han mostrado los distintos morteros es buena en general, si bien los cambios que se han producido son perceptibles. Los morteros realizados con arena del sitio se muestran más inestables que los mismos realizados con *Sascab* en los grupos técnicos IAA y PA. En el grupo IM, tanto los morteros realizados con *Sascab* (IMS), como los realizados con arena blanca (IMA), presentan pocos cambios (por debajo de 4 unidades  $\Delta E^*$ ). Contrariamente, en el grupo H, tanto los realizados con *Sascab* (HS), como con arena (HA) presentan un incremento de color total de más de 4 unidades  $\Delta E^*$ . En todos los grupos técnicos, los morteros patrón se muestran mucho más estables, con menos variaciones cromáticas, revelando que los aditivos orgánicos añadidos al mortero son sensibles a la irradiación de luz ultravioleta, produciendo la variación cromática en mayor o menor medida.
- o Los envejecimientos acelerados mediante ciclos de humidificación y secado, han revelado una pérdida de masa similar en cada una de las probetas, que se sitúa en torno al  $\pm 27\%$ , pero sin mostrar deterioros a nivel interno. Cabe destacar la aparición puntual de microorganismos en varias de las probetas del grupo PS. El comportamiento hídrico de las probetas una vez envejecidas es similar al de antes del ensayo; aunque se advierte un descenso general en el índice de absorción de agua por capilaridad y a presión atmosférica y un ligero aumento de la permeabilidad al vapor de agua, se puede decir que las propiedades hídricas de los morteros no se han visto alteradas, y que los morteros envejecidos siguen mostrando buenas propiedades frente al agua.
- o La exposición a la intemperie de los morteros en estudio ha resultado un factor clave para determinar la durabilidad de éstos en las condiciones ambientales reales. A pesar de no haberse podido completar la totalidad de probetas expuestas (por la sustracción del conjunto elaborados en 2011); se ha podido experimentar una gran diferencia de resistencia entre las probetas de los grupos IMS-IAS (elaborados con cal apagada por inmersión y *Sascab*) y el resto de grupos técnicos, los cuales no han resistido con éxito. La mayoría de probetas de IMS e IAS han permanecido en buen estado durante 4 campañas, mostrando leves alteraciones como fisuras o erosión superficial, con lo que ha quedado patente su idoneidad para las condiciones ambientales del sitio.

## 5.5 Valoración de las propiedades de los morteros estudiados; discusión y selección en base a su idoneidad

Para poder detectar y “predecir” el modo en que estos materiales se verán afectados, y poder garantizar su aplicación en el proceso restaurativo, se han llevado a cabo distintos ensayos de laboratorio en condiciones controladas y normalizadas. A lo largo del capítulo 5 se ha desarrollado el estudio de las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de los distintos grupos de morteros tradicionales, elaborados a partir de materia prima hallada y seleccionada en las inmediaciones del sitio La Blanca, y siguiendo las metodologías que se extraen de fuentes etnohistóricas y etnográficas. Para la valoración de los resultados obtenidos, se ha realizado una tabla comparativa resumen de dichos métodos, con indicación de los rangos obtenidos en cada variante de mortero y el promedio por grupo técnico (Tabla 5.22).

Tabla 5.22 Valoración final de las propiedades físicas, mecánicas y de estabilidad de las probetas.

GRUPO	PROB.	Cap	Pres.	Des.	$\delta$	$D_{op}$	Ad	Ab	Co	Sal	CT	Uv	hT	N
APAGADO POR INMERSIÓN / FUSIÓN	IASP5	0,52	22,4	-17,4	-2,4E-13	1561,4	B	A	3,7	4,7	A	A	A	A
	IASP2	0,53	22,4	-18,1	-2,5E-13	1528,8	B	A	3,2	5,3	A	A	A	A
	IASH5	0,45	21,8	-16,7	-2,5E-13	1543,3	B	A	3,2	6,0	A	A	A	A
	IASH2	0,65	30,2	-15,0	-2,8E-13	1481,5	B	B	3,4	4,7	A	A	A	M
	IASR5	0,58	19,4	-17,7	-2,1E-13	1591,8	B	A	2,0	4,0	A	A	A	A
	IASR2	0,64	27,0	-14,3	-2,8E-13	2288,1	B	A	3,6	4,0	A	A	A	A
	$\bar{x}$	0,56	23,9	-16,5	-2,5E-13	1665,8	B	A	3,2	4,8	A	A	A	A
	IAAP5	0,80	35,2	-18,9	-2,8E-13	1308,8	B	A	2,2	6,3	A	A	A	B
	IAAP2	0,70	34,3	-25,5	-	1328,0	B	A	3,2	12	A	A	A	-
	IAAH5	0,88	36,8	-22,0	-2,4E-13	1289,0	B	A	2,2	4,0	A	A	A	B
	IAAH2	0,91	33,0	-25,1	-3,5E-13	1351,1	B	B	2,4	12	A	M	A	A
	IAAR5	0,89	37,7	-22,4	-1,8E-13	1285,6	B	A	2,0	4,7	A	M	A	B
	IAAR2	0,73	35,1	-25,6	-4,2E-13	1316,8	B	A	2,5	12	B	A	A	A
	$\bar{x}$	0,82	35,3	-23,3	-2,9E-13	1313,2	B	A	2,4	9,0	A	M	A	B
	IMSR5	0,50	29,6	-23,6	-2,5E-13	1567,9	B	A	4,4	4,0	A	A	A	A
	IMSR2	0,61	23,6	-19,2	-2,7E-13	1421,2	B	A	3,2	4,0	A	M	A	A
	IMSH5	0,55	24,4	-19,8	-2,3E-13	1520,4	B	A	2,8	5,3	A	A	A	M
	IMSH2	0,64	25,5	-17,6	-2,9E-13	1507,8	B	B	2,5	4,7	A	A	A	M
	IMSP5	0,80	22,3	-13,9	-2,7E-13	1571,0	B	A	4,0	4,0	A	A	A	M
	IMSP2	0,52	22,4	-18,2	-2,9E-13	1556,0	B	A	3,2	4,0	A	A	A	M
ISP	0,52	11,3	-12,7	-2,3E-13	1544,3	B	A	3,1	4,0	A	A	A	A	
$\bar{x}$	0,61	24,6	-18,7	-2,60E-13	1524,0	B	A	3,3	4,3	A	M	A	M	
IMAH5	0,78	37,2	-23,2	-2,0E-13	1038,4	B	A	3,0	4,0	A	M	A	B	
IMAH2	0,66	31,4	-24,0	-3,6E-13	1402,2	M	A	4,2	12	A	A	A	-	
IMAR5	1,60	34,0	-16,2	-2,0E-13	1357,3	B	A	5,0	4,0	A	M	A	B	
IMAR2	0,76	33,4	-25,2	-3,8E-13	1373,9	M	B	3,2	12	A	A	A	-	
IMAP5	0,79	35,0	-13,8	-1,8E-13	1250,3	B	A	3,0	5,3	A	A	A	B	
IMAP2	0,66	35,1	-24,4	-3,7E-13	1312,3	B	A	3,4	12	A	A	A	-	
IAP	0,50	36,5	-27,4	-4,9E-13	1295,6	B	A	2,3	12,0	A	A	A	A	
$\bar{x}$	0,87	34,4	-21,1	-2,80E-13	1289,1	B	A	3,6	8,8	A	M	A	B	
APAGADO POR PUDRIFICIÓN	PSP5	0,45	22,7	-16,3	-3,9E-13	1822,4	B	A	1,8	9,0	A	A	M	B
	PSP2	0,48	26,4	-14,1	-2,3E-13	1475,1	B	A	1,7	11,7	A	A	A	B
	PSH5	0,48	25,1	-27,7	-2,0E-12	1456,9	B	M	2,4	6,0	A	A	M	B
	PSH2	0,46	25,2	-26,7	-1,4E-12	1432,8	B	M	2,5	10,3	A	A	M	B
	PSR5	0,44	25,2	-21,2	-3,8E-13	1590,0	B	M	2,1	6,0	A	A	M	B
	PSR2	0,51	26,1	-22,0	-5,1E-13	1401,5	B	A	2,5	9,3	A	A	A	B
	PSP	0,36	26,4	-15,4	-1,2E-12	1470,7	B	M	2,2	6,0	A	A	A	A
	$\bar{x}$	0,47	25,1	-21,3	-3,9E-13	1529,8	B	M	2,1	8,3	A	A	M	B
	PAR5	0,73	35,3	-20,2	-2,0E-13	1291,9	B	M	1,9	4,0	A	A	A	B
	PAR2	0,90	37,3	-29,8	-2,0E-13	1256,8	B	A	1,6	4,0	A	A	A	B
	PAH5	1,04	37,1	-7,8	-2,2E-13	1267,4	B	M	1,5	4,0	A	A	A	B
	PAH2	0,91	35,3	-18,3	-2,3E-13	1278,1	B	M	1,1	4,7	A	B	A	B
	PAP5	0,83	37,3	-24,0	-2,0E-13	1286,3	B	M	1,3	4,0	A	A	A	B
	PAP2	1,09	71,9	-48,1	-	1223,2	B	M	0,6	4,0	A	M	A	B
PAP	0,85	39,3	-60,8	-2,1E-13	1284,5	B	A	1,7	4,0	B	A	A	B	
$\bar{x}$	0,92	42,4	-24,7	-2,11E-13	1267,3	B	M	1,3	4,1	A	M	A	B	
APAGADO POR MEZCLADO EN CALIENTE	HSP5	0,75	32,8	-14,5	-1,8E-08	1381,2	B	M	4,7	3,7	A	A	A	-
	HSP2	0,84	30,1	-18,2	-1,8E-13	1447,5	B	A	0,7	4,0	A	A	A	-
	HSR5	0,96	30,6	-17,8	-2,3E-13	1450,0	B	A	2,9	4,7	A	A	A	-
	HSR2	0,71	34,7	-22,4	-2,2E-13	1322,7	B	A	0,3	4,0	A	A	A	-
	HSH5	0,78	31,1	-16,4	-1,8E-13	1357,5	B	M	5,5	4,0	A	A	A	-
	HSR2	0,70	30,8	-19,5	-1,9E-13	1403,8	M	A	1,1	4,0	A	B	A	-
	HSP	0,52	31,8	-16,1	-2,2E-13	1394,4	B	A	2,4	5,7	A	A	A	-
	$\bar{x}$	0,79	31,7	-18,1	-1,9E-13	1393,8	B	A	2,5	4,3	A	A	A	-
	HAH5	0,76	36,9	-18,3	-	1344,4	B	M	4,0	4,7	A	A	A	-
	HAH2	1,06	42,4	-18,6	-1,9E-13	1272,7	B	M	3,4	4,0	A	M	A	-
	HAP5	1,81	32,4	-12,9	-2,1E-13	1371,5	B	A	6,4	4,0	A	A	A	-
	HAP2	0,73	36,5	-17,0	-1,7E-13	1339,3	B	A	4,5	4,0	A	M	A	-
	HAR5	0,80	35,6	-11,5	-1,9E-13	1328,7	B	M	4,4	4,0	A	A	A	-
	HAR2	1,00	39,3	-18,6	-2,0E-13	1259,9	B	A	2,4	4,0	A	M	A	-
HAP	0,98	35,9	-12,1	-2,2E-13	1348,5	B	A	6,9	4,0	A	A	A	-	
$\bar{x}$	1,03	37,2	-16,2	-1,9E-13	1319,4	B	M	4,2	4,1	A	M	A	-	



**Abreviaturas tabla:**

Cap: Cantidad de agua absorbida por capilaridad por unidad de superficie ( $\text{gr}/\text{cm}^2$ ).

Pres: Cantidad de agua absorbida por probeta a presión atmosférica (%).

Des: Cantidad de agua desorbida por probeta a presión atmosférica (%).

$\delta$ : Permeabilidad al vapor de agua en ( $\text{gr}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{P}$ ).

$D_{ap}$ : Densidad aparente del mortero endurecido en  $\text{Kg}/\text{m}^3$ .

Ad: Determinación de la resistencia a la adhesión al soporte. Valorado en A (alta), M (media) y B (baja).

Ab: Determinación de la resistencia al desgaste por rozamiento. Valorado en A (alta), M (media) y B (baja).

Co: Determinación de la resistencia a la compresión en ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ). Valorado en A (alta), M (media) y B (baja).

Sal: Resistencia a la cristalización de sales. Promedio de ciclos soportados por tipo de mortero.

CT: Determinación de la resistencia al choque térmico. Valorado en A (alta), M (media) y B (baja), según pérdida de masa y cambios en la  $D_{ap}$ .

UV: Determinación de la resistencia al cambio cromático por irradiación de luz ultravioleta. Valorado en A (alta), M (media) y B (baja), según incremento de unidades de color total  $\Delta E^*$ .

HT: Determinación de la resistencia al envejecimiento acelerado por ciclos de humidificación y secado. Valorado en A (alta), M (media) y B (baja) según inspección visual, variación de la masa y variaciones en el comportamiento hídrico.

N: Determinación de la resistencia al envejecimiento natural. Valorado en A (alta), M (media) y B (baja), según inspección visual y variación en el comportamiento hídrico.

$\bar{x}$ : Promedio de los resultados de cada tipo de mortero. El cálculo no incluye la probeta patrón. Se resalta en rojo los resultados menos favorables, en verde los más favorables y en amarillo los resultados intermedios.

A (alta, verde), M (media, amarillo), B (baja, rojo): Valoración de la resistencia a los distintos ensayos, según el rango de resultados obtenidos en cada caso.

### 5.5.1 Valoración de las propiedades físicas

Las propiedades del morteros se determinan en función de varios factores. Los materiales constitutivos, su dosificación, el modo de trabajo y las condiciones durante la carbonatación crearán unas características particulares en cada mezcla de mortero, que según los requisitos y finalidad de dicho mortero, podrán ser más idóneas o menos.

Dada la ubicación y las condiciones ambientales del caso de estudio (La Blanca), las propiedades físicas que más nos interesan en esta tesis son las hídricas, es decir, valorar el comportamiento que cada mortero experimenta frente al agua con tal de obtener unos criterios estimados de la durabilidad. En este sentido se observan diferencias claras entre los grupos técnicos realizados con *Sascab* (IAS, IMS, PS,) y aquellos compuestos por arena blanca del sitio (IAA, IAM, PA,):

- o Los grupos realizados con *Sascab* (excepto el grupo H), muestran un promedio de absorción de agua por capilaridad y a presión atmosférica significativamente menor que los grupos realizados con arena. Por el contrario en el grupo H, la absorción es muy similar tanto en HS como HA, y significativamente mayor que el promedio del resto de grupos. Tampoco ha mostrado buenos resultados el grupo PA, registrando la mayor cota de absorción a presión atmosférica (42,5%).

- o Esta diferencia en la absorción de agua está directamente relacionada con la granulometría del árido, el número de poros y el grado de interconexión de éstos, siendo mayor en el caso de la arena, por lo que se crea una porosidad abierta y accesible al agua (Pavía y Treacy 2006: 396, citado en Barbero 2002). Este fenómeno se evidencia con los valores de densidad aparente ( $D_{ap}$ ), que son siempre menores en los grupos elaborados con arena, por un mayor contenido en aire, y más elevados en los grupos de *Sascab*, por crear un mortero más compacto y menos accesible al agua dada su baja granulometría.
- o La adición de las gomas en los morteros generan una red de macro-poros mal comunicados por la incorporación de aire en modo de burbujas, produciendo la reducción de la tensión capilar y de la capacidad de absorber agua (Guash 2016:335). No obstante, en nuestro caso de estudio esta teoría no se lleva a cabo ya que todos los morteros, de todos los grupos técnicos muestran una absorción mayor que las probetas patrones; revelando que la adición de estos extractos influye y modifica el comportamiento hídrico de los morteros pero aumentando su poder de absorción (tanto por capilaridad como a presión atmosférica).
- o Además de mayor poder de absorción, los morteros adicionados varían su comportamiento según la cantidad del exudado que contengan. Mientras que en el grupo IAS e IMS (elaborados con *Sascab*) los morteros con 2% de exudado (todos los tipos), absorben más agua que los que tienen 0,5% de aditivo; en los grupos IAA e IMA (elaborados con arena blanca), los morteros con 2% tienen tendencia a absorber menos que los que contienen 0,5% de aditivo. Esto puede deberse a que en los morteros de *Sascab*, la incorporación de las gomas actúa como agente higroscópico y retenedor de agua. Este hecho queda constatado por el test de fenolftaleína, donde se comprobó que los morteros realizados con *Sascab* presentan una carbonatación mucho más lenta que los realizados con arena blanca, por lo que la combinación de las gomas con el denso mortero que produce el *Sascab*, modifica el proceso normal de carbonatación al retenerse agua en la estructura interna, mostrándose las superficies violetas después de un largo periodo de curación (hasta 4 años).
- o En términos de desorción, se observa que los morteros siguen el mismo comportamiento que para la absorción a presión atmosférica, y que cuánto mayor es el porcentaje de absorción, mayor es el porcentaje de desorción. Con ello obtenemos que los grupos realizados con *Sascab*, nuevamente presentan un comportamiento más adecuado, al evaporar con mayor facilidad mayor cantidad de agua. El grupo técnico que mejor evaporación presenta es PS, que es capaz de expulsar casi la totalidad de agua absorbida. El grupo HA, presenta un porcentaje muy bajo de desorción, siendo el mortero que más cantidad de agua retiene.
- o Todos los grupos técnicos presentan buena permeabilidad al vapor de agua, con unos valores muy similares; sólo con la diferencia del grupo PS que presenta la permeabilidad más baja. Aún así no se puede decir que la adición de las gomas modifique ni reduzca la permeabilidad al vapor de agua, y todos los grupos son válidos en este aspecto.

## 5.5.2 Valoración de las propiedades mecánicas

Para la valoración de las propiedades mecánicas, es muy importante tener en cuenta la adhesión de los morteros al soporte ya que la finalidad de éstos es reintegrar los estucos originales ubicados mayormente en paramentos verticales. Para ello, además del ensayo de resistencia a la adhesión, se tendrá muy en cuenta el ensayo de envejecimiento por exposición de las probetas. De la determinación de las propiedades mecánicas de los morteros estudiados se extrae que:

- o La resistencia a la adhesión al soporte por tracción directa que muestran todos los morteros es bastante baja, correspondiéndose con un mortero estándar de cal aérea. La fuerza de resistencia mostrada es menos de 10 kgf., y sólo los morteros IMAH2, IMAR2 y HSH2 han mostrado una fuerza igual a 10 kgf., pudiéndose deducir que las gomas añadidas en el mayor porcentaje (2%) incrementan la adhesión al soporte. Esta baja resistencia a la tracción ha producido roturas de tipo A (adhesiva), producidas en la interfase entre el mortero y el soporte, donde el valor de ensayo es igual a la resistencia a la adhesión (resistencia de unión), y también de tipo B (cohesiva), producida en el mortero, donde la resistencia a la adhesión es mayor que el valor del ensayo. Este tipo de rotura se ha dado sobretodo en el grupo PA y PS al ser un mortero menos cohesionado
- o La resistencia que ofrecen los morteros a la abrasión varía notablemente entre los grupos IMS, IMA, IAS e IAA, con una resistencia buena, de grado 2 superficial y de grado 2 en profundidad (ver Fig. 5.24, capítulo 5 punto 5.3.1 ); y los grupos PS y PA, que presentan daños de grado 3 tanto en anverso como en reverso, llegando a romperse parte de la probeta durante el ensayo dada su poca resistencia. Los grupos HA y HS muestran superficies muy fuertes y resistentes a la abrasión con marcas de grado 1 y 2.
- o En el ensayo de resistencia a la compresión se observan resultados mecánicos similares a la abrasión, ya que los grupos PS y PA muestran las resistencias más bajas (2,1 y 1,3 N/mm<sup>2</sup> respectivamente), lo que refuerza el hecho de que estos morteros realizados con cal apagada por pudrición presentan una cohesión interna baja. Los grupos IAS, IAA, IMS, IMA, HS y HA presentan resistencias muy altas para tratarse de morteros de cal aérea, que pueden clasificarse en la categoría CSII<sup>8</sup> (1,5 a 5,0 N/mm<sup>2</sup>) según UNE-EN 1015-11:2000/A1:2007. La adición de las gomas en mayor o menor porcentaje no parece tener influencia en la resistencia, pero sí produce un descenso general en la resistencia ya que las probetas patrón obtienen valores más altos que sus homólogos realizados con aditivos. En todo caso son resistencias muy altas y válidas para el caso que nos ocupa, y se tendrá en cuenta sobretodo para la selección del mortero en superficies horizontales (que puedan ser pisadas).

<sup>8</sup> CS (Compression Strenght). Según UNE-EN 1015-11:2000/A1:2007, CSI= 0,4 a 2,5 N/mm<sup>2</sup>, CSII=1,5 a 5,0 N/mm<sup>2</sup>, CSIII=3,5 a 7,5 N/mm<sup>2</sup> y CSIV= $\geq$ 6 N/mm<sup>2</sup>.

### 5.5.3 Valoración de la durabilidad frente a agentes de deterioro físico-químico

Los ensayos de durabilidad realizados han sometido a los morteros a condiciones físico-químicas extremas con el fin de determinar que especímenes se mantienen más estables frente a dichas condiciones y cuales muestran signos de alterabilidad, pudiendo prever aquellos más adecuados y con mayores garantías de estabilidad para ser aplicados en La Blanca. De estos ensayos realizados en laboratorio se extraen las siguientes conclusiones:

- o La cristalización de sales en los diferentes morteros ha resultado ser un agente muy agresivo, produciendo daños graves que son visibles desde el primer ciclo completo. De los grupos técnicos elaborados con cal apagada por inmersión (IAA, IAS, IMA, IMS), la variante realizada con arena blanca (IAA, IMA) tiene un promedio de ciclos resistidos superior que la variante realizada con *Sascab* (IAS, IMS) ya que los morteros IAAP2, IAAR2, IMAH2, IMAR2 e IMAP2 han resistido una media de 12 ciclos, poniendo de manifiesto que la adición de las gomas en el porcentaje mayor ha tenido una influencia positiva en la resistencia a la cristalización de sales. Por el contrario en las variantes realizadas con *Sascab*, la media de ciclos soportados es menor (entre 4,3 y 9,0). Esta diferencia tan acusada puede explicarse por la mayor porosidad de los morteros de arena, incrementada por la adición de las gomas. La presencia de macro poros mitiga el daño ocasionado por las sales ya que éstas tienen el espacio necesario para cristalizar y al aumentar su tamaño, no ejercen presión en el poro. Por el contrario, en el mortero de *Sascab*, cuando las sales aumentan su volumen por la absorción de agua, ejercen presión hacia fuera ya que no tienen espacio suficiente en los micro poros, ocasionando fisuras en el mortero y acelerando su desintegración. Todos los morteros se desintegran completamente, no pudiéndose determinar su masa al finalizar el ensayo.
- o La resistencia frente a los ciclos de choque térmico y de humidificación y secado ha resultado ser bastante buena para todos los grupos técnicos. Los cambios bruscos, tanto de temperatura como del estado seco a húmedo no han afectado de forma grave a la consistencia del mortero, produciéndose un ligero descenso de la masa final de aproximadamente el 30% en todos los grupos técnicos. La densidad aparente también ha descendido tras el ensayo en algunos morteros del grupo P, aunque de forma general ha aumentado como consecuencia de la retención de agua lenta en la red porosa. Como aspecto negativo hay que señalar la aparición puntual de moho (negro) en los morteros PSH5, PSH2, PSR5 y PAP2, lo que los convierte en candidatos susceptibles para la proliferación de microorganismos en las condiciones ambientales reales.
- o Si bien los morteros destinados a la reintegración de los estucos deberán estar protegidos bajo una cubierta, es cierto que de forma indirecta recibirán en mayor o menor medida radiación ultravioleta según la posición horaria del sol. Por ello, se ha de tener en cuenta la variabilidad cromática de la superficie de los morteros, y seleccionar en la medida de lo posible aquel más estable. Tras 500 horas de exposición ultravioleta en cámara artificial, se ha comprobado que el árido presente tiene una influencia directa en la estabilidad cromática de los morteros. Los morteros elaborados con arena blanca presentan peor estabilidad y más variación cromática total ( $\Delta E^*$ ) que los elaborados con *Sascab*. Del mismo modo, la adición de las gomas orgánicas también produce la inestabilidad cromática, sobretodo en los grupos realizados con arena

blanca, ya que sus variaciones cromáticas siempre son superiores a sus homólogas probetas patrón. El comportamiento de los morteros compuestos por *Sascab* es bastante similar a su probeta patrón, en todos los grupos técnicos. La única excepción es el grupo H, que tanto los realizados con arena (HA) como con *Sascab* (HS), muestran un incremento total de color ( $\Delta E^*$ ) muy superior a sus probetas patrón. Por todo ello, los grupos que han resultado ser más estables (con un incremento de menos de 3 ( $\Delta E^*$ )) a los cambios cromáticos por radiación ultravioleta son PS e IAS, además de sus homólogos morteros patrón, realizados sin aditivos.

#### 5.5.4 Valoración de la durabilidad frente al envejecimiento natural

La exposición *in situ* de las probetas ha permitido la valoración más aproximada al comportamiento real de los distintos morteros, ya que han permanecido en las condiciones ambientales reales durante un periodo de tiempo considerablemente largo. A pesar de que algunos imprevistos hayan impedido la exposición de todos los tipos de mortero, y de que la exposición no haya sido del mismo periodo de tiempo para todos (dado que cada grupo técnico se ha realizado en campañas de trabajo diferentes), se han hallado diferencias notables entre los grupos que han podido ser expuestos, concluyendo que:

- o Los grupos realizados mediante apagado por inmersión y *Sascab* (IAS e IMS), aplicados en 2013, han mostrado una durabilidad excelente durante 4 años, en los que apenas se han detectado signos de alteración en la superficie. Tras los segundos ensayos *in situ* de penetrabilidad de agua (2017), algunas de las probetas se fracturaron y terminaron por desprenderse seguidamente (IMSP2, IMSH2, IMSP5, IMSH5 e IASH2). El resto de probetas, especialmente del grupo IAS se han mantenido en buenas condiciones, soportando incluso la tracción que supone el ensayo de penetrabilidad de agua.
- o De las probetas del grupo PS, aplicados en 2015, se conservaron *in situ* (aunque cubiertas de microorganismos) excepto PSR2 y PSR5, que en la campaña de 2016 se encontraron desprendidas. Tras realizar el ensayo de penetrabilidad de agua, todas las probetas (PSP2, PSP5, PSH2, PSH5) se desprendieron del soporte, resistiendo únicamente la probeta patrón (PSP).
- o La probetas del grupo IAA y PA que fueron aplicadas en 2016 (Tabla 5.23), han mostrado bastante resistencia en dos años, encontrándose en la campaña de trabajo de 2018 casi todas en buen estado, a excepción de IAAR5, que se ha desprendido y las probetas IAAP5, IAAP2 e IAAH5 que muestran fracturas ocasionadas por el ensayo de penetrabilidad de agua, realizado en 2017. De la evolución en el tiempo de estas muestras podemos extraer que los morteros que mejor durabilidad muestran son los del grupo realizado con cal pagada por inmersión, concretamente la variante IAS. Los morteros realizados con el menor porcentaje de aditivo (0,5%), tienen una resistencia más alta, lo que se tendrá en cuenta para la selección final del mortero de reintegración.

Tabla 5.23 Relación de probetas que han sido expuestas en La Blanca y evolución del envejecimiento natural observado en cada campaña de trabajo realizada.

PROBETA	2011	2013	2015	2016	2017	2018
IMAP2	EXPUESTA	PERDIDA				
IMAR2	EXPUESTA	PERDIDA				
IMAH2	EXPUESTA	PERDIDA				
IAAP2	EXPUESTA	PERDIDA				
IAAR2	EXPUESTA	PERDIDA				
IAAH2	EXPUESTA	PERDIDA				
IAP	EXPUESTA	PERDIDA				
IMSP2		APLICADA	OK	OK	OK	DESPRENDIDA
IMSR2		APLICADA	OK	OK	OK	OK
IMSH2		APLICADA	OK	OK	OK	DESPRENDIDA
IMSP5		APLICADA	OK	OK	FRACTURADA	DESPRENDIDA
IMSR5		APLICADA	OK	OK	OK	FRACTURADA
IMSH5		APLICADA	OK	OK	OK	DESPRENDIDA
IASP2		APLICADA	OK	OK	OK	FRACTURADA
IASR2		APLICADA	OK	OK	OK	OK
IASH2		APLICADA	OK	OK	OK	DESPRENDIDA
IASP5		APLICADA	OK	OK	OK	OK
IASR5		APLICADA	OK	OK	OK	OK
IASH5		APLICADA	OK	OK	OK	OK
ISP		APLICADA	OK	OK	OK	OK
PSP2			APLICADA	OK	DESPRENDIDA	
PSR2			APLICADA	DESPRENDIDA	DESPRENDIDA	
PSH2			APLICADA	OK	DESPRENDIDA	
PSP5			APLICADA	OK	DESPRENDIDA	
PSR5			APLICADA	DESPRENDIDA	DESPRENDIDA	
PSH5			APLICADA	OK	DESPRENDIDA	
PSP			APLICADA	OK	Ok	Ok
PAP2				APLICADA	OK	OK
PAH2				APLICADA	OK	OK
PAP5				APLICADA	OK	OK
PAH5				APLICADA	OK	OK
IMAP5				APLICADA	OK	OK
IAAP5				APLICADA	FRACTURADA	FRACTURADA
IAAH2				APLICADA	OK	OK
IAAP2				APLICADA	FRACTURADA	DESPRENDIDA
IAP				APLICADA	OK	OK
IAAR2				APLICADA	OK	OK
IAAR5				APLICADA	DESPRENDIDA	
IAAH5				APLICADA	FRACTURADA	DESPRENDIDA

### 5.5.5 Selección del mortero idóneo

Resulta difícil seleccionar un único tipo de mortero ya que son varios los grupos técnicos que han dado buenos resultados para el caso que nos ocupa.

Quedan descartados los morteros del grupo H, tanto HS como HA ya que a pesar de mostrar buena permeabilidad y buena estabilidad a los cambios ambientales, presentan demasiada absorción y poca estabilidad cromática frente a los rayos ultravioleta. El grupo PA, realizado con cal apagada por pudrición y arena del sitio ha mostrado ser poco consistente, tener alto poder de absorción y poca estabilidad cromática; por lo que queda descartado. El grupo PS, realizado con *Sascab*, presenta buenas propiedades hídricas y buena resistencia a las soluciones salinas; pero la aparición de microorganismos durante los ciclos de variación de humedad y temperatura, y la poca durabilidad mostrada en la exposición natural, hacen que quede descartado.

De los tres grupos técnicos (apagado por inmersión, apagado por pudrición y apagado por mezcla en caliente), se han obtenido resultados superiores en todos los morteros que se hallan dentro del primer grupo. Desde el momento de la elaboración del mortero, se advierte una plasticidad y trabajabilidad muy buena gracias a la incorporación de la cal apagada en forma de pasta. Tanto el grupo que emplea cal apagada en agua (IAA-IAS), como el compuesto por cal apagada en las distintas maceraciones (IMA-IMS) da como resultado una pasta muy homogénea, que se convierte en un mortero con una estructura densa y uniforme.

Tras la valoración de resultados, se ha demostrado que el grupo IMS-IMA, pese a poseer muchas de las cualidades que se requieren en este mortero de reintegración, no han dado buenos resultados en la exposición al envejecimiento natural, mostrando poca adherencia al soporte y fracturándose o desprendiéndose en un corto periodo de tiempo. Además, su concentración más alta en gomas orgánicas (al estar apagada la cal con el agua de la maceración), produce mayor inestabilidad cromática, con un incremento considerable del color total ( $\Delta E^*$ ).

Del grupo IA (cal apagada por inmersión en agua mas el agua de las maceraciones en el amasado del mortero), se observan resultados más negativos en la variante realizada con arena blanca del sitio (IAA), ya que presenta un comportamiento hídrico con mayor poder de absorción, tanto por capilaridad como a presión atmosférica, menos estabilidad cromática y menos resistencia al envejecimiento por exposición natural. Por ello, el grupo que ha mostrado tener las propiedades idóneas para el caso que nos ocupa es IAS, con buenos resultados tanto en el comportamiento hídrico, como en la resistencia mecánica y resistencia a los ensayos de durabilidad. Como se ha observado, dentro de este grupo, los morteros realizados con la mayor proporción de aditivo (2%), presentan mayor absorción de agua tanto por capilaridad como a presión atmosférica, así como menor índice de permeabilidad al vapor de agua y mayor variación cromática por exposición ultravioleta. Por ello, se decide seleccionar el porcentaje más bajo de aditivo orgánico, ya que no interfiere de forma negativa en estos aspectos. Dado que no se observan factores determinantes que mejoren las propiedades dependiendo del tipo de goma empleada (especie arbórea), se decide realizar esta selección en base a una cuestión ecológica. Se ha seleccionado el extracto de corteza de Pixoy (*Guazuma Ulmifolia*) como mejor opción ya que el volumen de goma que se puede extraer de una misma cantidad de corteza es muy superior en esta especie arbórea. Seleccionando este aditivo al menor porcentaje (0,5%) se necesitaría 140 gr de corteza para obtener 5000 gr de agua de maceración, mezclada en proporción 1:3:<1 (volumen de cal, volumen de arena, volumen de agua) para obtener el mortero.





# CAPÍTULO 6

## PROPUESTA METODOLÓGICA PARA UNA INTERVENCIÓN SOSTENIBLE

El patrimonio arqueológico constituye el testimonio esencial de las actividades humanas del pasado. Su protección y su adecuada gestión son imprescindibles para permitir su estudio e interpretación en nombre de generaciones presentes y futuras, y para beneficio de las mismas (UNESCO 1990).

El empleo, en el pasado siglo XX, de materiales poco afines con los originales y con el medio natural que los envuelve, como el cemento o las resinas sintéticas, desencadenó graves daños en el patrimonio arqueológico maya (García *et.al* 2010), revelando la necesidad de emplear distintas metodologías. Actualmente, y gracias a los esfuerzos interdisciplinarios de investigadores y profesionales en el campo de la arqueología y de la conservación y restauración, prevalece una tendencia a buscar soluciones alternativas, más afines, así como a minimizar las acciones restaurativas, dando mayor preferencia a la conservación preventiva, procurando la reducción del gasto económico y la recuperación de materiales y técnicas tradicionales, en armonía con los materiales originales, evitando el uso de productos sintéticos o incompatibles que producirán a mediano plazo situaciones incontrolables (Meehan y Alonso 2013:203).

Las intervenciones *in situ*, llevadas a cabo en las sucesivas campañas de trabajo (Cap. 4, Bloque 1) en La Blanca, nos han permitido llevar un control sobre estas así como realizar la evaluación de los deterioros de los estucos y determinar sus causas. Con el conocimiento de los mecanismos de desarrollo de estas patologías, se propone la siguiente metodología adaptada a los requisitos de este sitio arqueológico.

## 6.1 Criterios fundamentales de restauración

A partir de las cartas internacionales redactadas por el Consejo Internacional de Monumentos y Sitios de la UNESCO, se han formulado una serie de principios fundamentales que deben ser respetados en la intervención de sitios arqueológicos, y en el caso que nos ocupa, en la restauración de los estucos de La Blanca.

### *Mínima intervención*

Los elementos de reintegración serán siempre reconocibles y constituirán el mínimo necesario para asegurar las condiciones de conservación del monumento y restablecer la continuidad de sus formas (Artículo 15, UNESCO 1964).

### *Reversibilidad*

Aunque se ha demostrado que la reversibilidad de una intervención no está del todo garantizada, se debe exigir que ésta sea de carácter re-tratable, es decir, que la intervención efectuada no impida nuevos tratamientos en el futuro. Por ello los materiales que se empleen en la restauración deben ser ligeramente más débiles que los originales para que cualquier daño físico-químico afecte preferentemente a éstos, eliminándose y reponiéndose con facilidad (Torraca 1998; citado en Magar 2013: 161).

### *Compatibilidad*

Se debe asegurar la compatibilidad entre los materiales, garantizando la estabilidad del comportamiento entre los materiales originales y aquellos añadidos en la intervención. Elegir materiales con una estructura y comportamiento similar al original para que el nuevo conjunto, se comporte adecuadamente en las condiciones ambientales previstas (Torraca 1998:9; citado en Magar 2013: 161).

### *Diferenciación*

Los elementos añadidos en la restauración deben integrarse armoniosamente en el conjunto, distinguiéndose claramente de los originales, a fin de que la restauración no falsifique el documento artístico o histórico (Artículo 12, UNESCO 1964).

### *Mantenimiento y conservación*

Conservar *in situ* debe ser el objetivo fundamental de la conservación del patrimonio arqueológico. Cualquier traslado viola el principio según el cual el patrimonio debe conservarse en su contexto original (Artículo 6, UNESCO 1990). El mantenimiento de las ruinas y de las medidas necesarias para la conservación y protección permanente de los elementos arquitectónicos y de los objetos descubiertos deben estar garantizados. Se emplearán todos los medios que faciliten la comprensión del monumento descubierto sin desnaturalizar su significado (Artículo 15, UNESCO 1964).

### *Documentación y publicación*

Los trabajos de conservación y restauración siempre irán acompañados de la elaboración de documentación precisa en forma de informe analíticos y críticos, ilustrados, que se depositarán en los archivos del organismo encargado (Artículo 16, UNESCO 1964).

### *Difusión y cooperación*

El compromiso y la participación de la población local deben impulsarse y fomentarse como medio de promover la subsistencia del patrimonio arqueológico, especialmente cuando se trata de poblaciones autóctonas o grupos culturales de carácter local; confiándoseles la responsabilidad de la protección y la gestión del sitio (Artículo 6, UNESCO 1990).

## 6.2 Restauración de los estucos: Acciones principales

La intervención sobre los estucos de La Blanca tiene el objetivo principal de procurar su estabilización, minimizando los agentes de deterioro y dando prioridad al control de los elementos circundantes. De este modo y cumpliendo con el criterio de mínima intervención, se empleará el mortero IASP5, seleccionado en la fase experimental por su buen comportamiento para su aplicación como elementos de reintegración, refuerzo y sellado. Asimismo se realizarán y recomendarán acciones preventivas fundamentales como procurar cubiertas de protección o mejorar el drenaje de las aguas para lograr a largo plazo la pervivencia de estas manifestaciones artísticas.

### 6.2.1 Documentación y registro gráfico inicial

En primer lugar se debe realizar un estudio minucioso del estado de conservación en el que se hallan los estucos en el momento anterior a su intervención. Aunque el seguimiento del deterioro de los estucos se ha estado realizando en cada campaña de trabajo, son muchos los factores externos que pueden intervenir y afectar a su conservación, pudiendo producirse graves daños en muy poco tiempo. Por ello se debe determinar en que estado se hallan y cuáles son los factores que han producido el deterioro para poder erradicarlo.

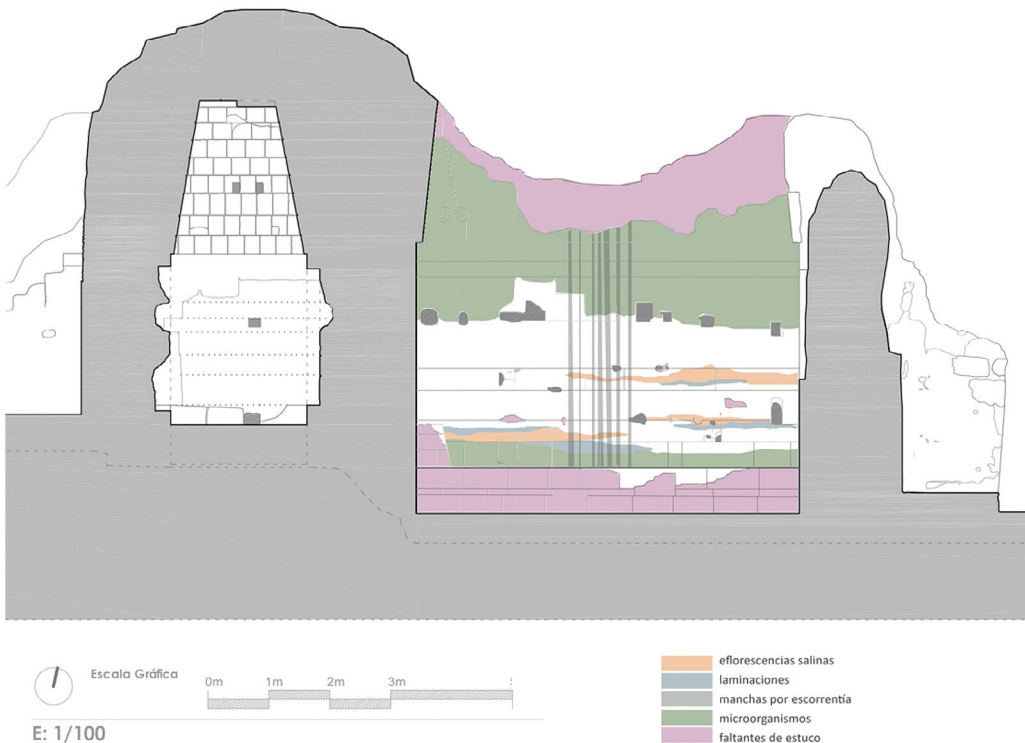


Fig.6.1 Ejemplo de croquis de daños muro N 6J2-4. Basado en plano de levantamiento arquitectónico del Proyecto La Blanca (Muñoz G., Matarredona N. y Marín B. 2007), modificado por la autora.

Es muy importante realizar el registro fotográfico detallado de cada estancia y de los daños que presenta para poder confeccionar mapas de daños precisos (Fig. 6.1) y proponer una estrategia de intervención específica y apropiada a cada estancia o zona.

### 6.2.2 Limpieza físico-mecánica de los estucos y del soporte pétreo

Una de las principales tareas a realizar es la limpieza de las superficies de los paramentos con una doble finalidad; la función conservativa, ya que al eliminar los depósitos acumulados en la superficie, incluyendo grietas, lagunas y oquedades del muro, prevenimos la formación de anidamientos y de depósitos orgánicos que promueven la proliferación biológica; así como también permite visualizar fisuras u otros daños imprescindibles para diagnosticar el estado de conservación del material. Por otra parte, la finalidad estética, ya que al eliminar los depósitos que cubren la superficie, se devuelve la apariencia original de los estucos, revelando detalles sutiles ocultos como huellas de pintura o grafitos incisos. Las acciones de limpieza que se deben llevar a cabo son (Fig.6.2):

#### *Limpieza mecánica superficial*

En primer lugar se realizará una limpieza suave mediante cepillos y brochas para eliminar el polvo superficial y las exudaciones de sulfato cálcico que se depositan periódicamente sobre los estucos. Se eliminan también depósitos orgánicos existentes en orificios o superficies horizontales (banquetas, pisos, arranque de bóveda). En las zonas del paramento que han perdido el estuco, especialmente en las franjas bajas de los muros, se encuentra a la vista el soporte pétreo, generalmente afectado por la cristalización cíclica de sales en forma de pulverulencia superficial. Estas zonas serán primordiales a la hora de ser reintegradas con mortero, por lo que es importante limpiar de forma mecánica el sustrato pulverulento para que el área a intervenir esté estable y garantice el buen agarre del mortero.

#### *Eliminación de plantas mayores*

Es muy importante cortar el crecimiento de plantas que han germinado sobre los muros o pisos de las estancias. Las plantas tropicales son de rápido crecimiento y pueden desencadenar importantes daños con el desarrollo de sus raíces. Para eliminarlas, se debe cortar el tallo y no arrancar la planta de raíz ya que se podría romper el material en el que han enraizado. Es preferible aplicar sobre las raíces un herbicida para garantizar que la planta no vuelva a crecer o bien revisar y eliminar periódicamente.

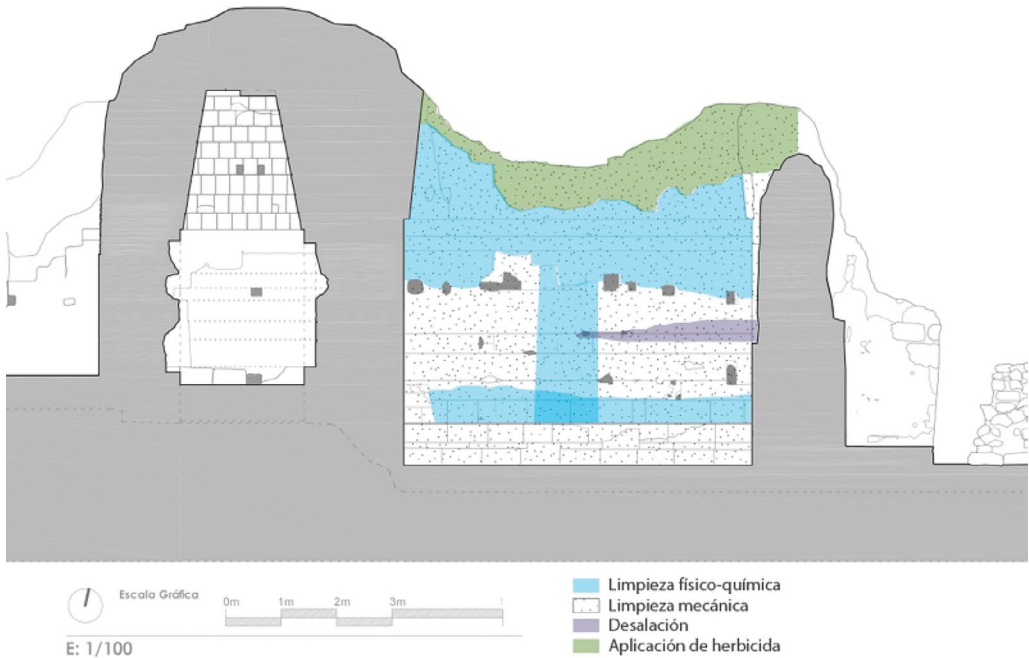


Fig. 6.2 Propuesta para la limpieza del muro N, 6J2-4. Basado en plano de levantamiento arquitectónico del Proyecto La Blanca (Muñoz G., Matarredona N. y Marín B. 2007), modificado por la autora.

### *Limpieza físico-química*

Se aplica especialmente en aquellas zonas que por filtraciones de agua, han sido atacadas por microorganismos y presentan pátinas cromáticas que van del verde al negro. Para ello se recomienda emplear un fungicida (etanol), aplicado por empaco. Dejándolo actuar durante un tiempo considerable (dependiendo de la magnitud de la concreción) comprendido entre 10 y 30 minutos (previas catas de tiempo-actuación). Para evitar la evaporación del disolvente se debe cubrir el empaco con film transparente y terminar de retirar las concreciones biológicas mediante hisopo y etanol.

### 6.2.3 Eliminación de antiguas reposiciones

Como se relató en el capítulo 4 del Bloque 1, durante el transcurso del Proyecto y a lo largo de las campañas de trabajo, se han ido realizado intervenciones de urgencia sobre los estucos originales, a medida que la excavación avanzaba y éstos salían a la luz. Estas intervenciones de carácter conservativo, dirigidas a reforzar y estabilizar los estucos, se han realizado principalmente con morteros de restauración (PLM-A<sup>®</sup>, PLM-M<sup>®</sup> de la casa CTS) o con morteros naturales elaborados con cal y arena del sitio o *Sascab*, pero sin aditivos orgánicos, ya que el buen comportamiento de las gomas no estaba garantizado antes del estudio. Una vez finalizada esta investigación y valorados los resultados, se ha observado que el mortero realizado sin extractos vegetales (correspondiente en el estudio a ISP e IAP) tiene buenos resultados frente a los ensayos realizados, y aunque no se trata del mortero seleccionado, su aplicación es segura. Por ello, los refuerzos perimetrales que se han estado aplicando en las sucesivas campañas, podrán ser retirados en la medida de lo posible si su eliminación no pone en riesgo la integridad del estuco. Cuando estos refuerzos se encuentren en buen estado y afianzados al soporte y al estuco, se recomienda no eliminarlos.

### 6.2.4 Selección de las zonas a reintegrar

Una vez limpias las superficies a intervenir, se decidirán las áreas que necesitan ser reintegradas, donde se aplicará el mortero seleccionado (Fig. 6.3). Esta selección no debe ser arbitraria, y debe ajustarse y ser respetado el principio de mínima intervención, por lo que el mortero sólo debe aplicarse en aquellas zonas donde cumpla una función de refuerzo y protección para los estucos originales.

Cabe mencionar que el mortero estudiado está enfocado a la conservación de los estucos originales que se hallan en La Blanca, ubicados en el interior de las estancias, por lo que su aplicación estará limitada a los espacios interiores de la arquitectura, siempre protegidos con cubiertas o con las propias bóvedas de las estancias.

De acuerdo al lugar y a la funcionalidad que desempeñe el mortero incorporado, su aplicación se especifica de la siguiente manera:

#### *Como refuerzo perimetral de los estucos*

Se realizará en aquellas áreas de estuco que hayan perdido los refuerzos perimetrales provisionales, o donde éstos se hayan retirado por encontrarse en mal estado para ser restituidos. Estos refuerzos pueden aplicarse como único sistema en zonas donde no es necesaria la reintegración de lagunas, y está especialmente indicado para rematar las zonas superiores del estuco, donde termina el muro original o arranca la bóveda.

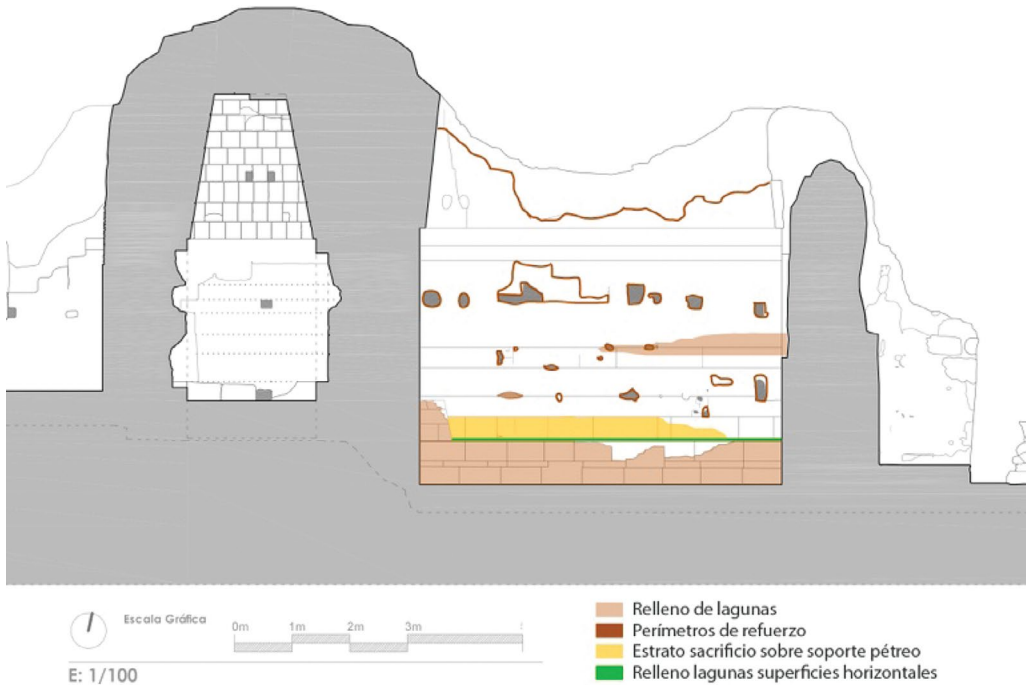


Fig. 6.3 Propuesta para la reintegración del muro N, 6J2-4. Basado en plano de levantamiento arquitectónico del Proyecto La Blanca (Muñoz G., Matarredona N. y Marín B. 2007), modificado por la autora.

### *Como sellado de grietas y fisuras*

A menudo se localizan grietas de tamaño importante que han fracturado el revestimiento como consecuencia generalmente de movimientos estructurales en la arquitectura. Estas grietas (ya consolidadas estructuralmente), suponen un punto de debilitamiento mecánico para los estucos, además de una vía de acceso para la humedad y con ello, para la activación biológica. Por ello se recomienda rellenar estas zonas abiertas como refuerzo y como sistema preventivo.

### *Como refuerzo mecánico e integración visual mediante relleno de lagunas*

Bajo la misma premisa que el apartado anterior, el relleno de lagunas supone en primer lugar un refuerzo del revestimiento de estuco, ya que éste posee una estructura continua, y su ruptura supone el debilitamiento y la aceleración del deterioro. En segundo lugar, supone la reintegración visual, devolviendo a los paramentos la lectura original de un estuco continuo. Por ello se recomienda el relleno de lagunas aisladas y/o conectadas, que dividen el estuco original en secciones aisladas a lo largo del paramento.



### *Como protección del soporte pétreo (estrato de sacrificio)*

Los recubrimientos de protección son revestimientos superficiales aplicados sobre los elementos constructivos o acabados originales, cuya finalidad es protegerlos, creando una barrera ante los factores de degradación ambiental que les afectan, modifican y destruyen; consiguiendo que éstos reciban el impacto de los factores de deterioro y se lleve a cabo en ellos los mecanismos de degradación, favoreciendo y prolongando la estabilidad de los materiales originales subyacentes (Meehan y Alonso 2013:204).

Las franjas inferiores de los muros internos de las estancias son con diferencia las zonas más afectadas por la humedad, especialmente la absorbida por capilaridad, como vimos en el capítulo 4, Bloque 1. Aparecen muy deterioradas, con grandes pérdidas de estuco, que sigue perdiéndose tras la excavación apresuradamente. Este deterioro se debe a que en esta zona se producen ciclos repetidos de cristalización de sales al evaporar la humedad que asciende desde el subsuelo; desprendiendo el estuco y desintegrando continuamente el soporte pétreo. La aplicación del mortero de reintegración en estas zonas se propone como un estrato de protección (sacrificio), procurando que la cristalización de sales se produzca en este nivel superficial (mayormente) y no en el soporte pétreo. Cuando este estrato se encuentre muy afectado, podrá ser retirado y renovado por otro.

### *Como refuerzo de superficies horizontales transitables*

En último lugar, pero no menos importante es la conservación de los pisos y superficies de estuco de las banquetas, que aunque no suelen presentar vestigios artísticos, forman parte del revestimiento de la arquitectura. Por ello y dado que el sitio de La Blanca es visitable y transitable, se recomienda la protección de los pisos originales mediante el refuerzo y relleno de lagunas. Con ello se consigue dar uniformidad a esta superficie, evitando la formación de “huecos” y desniveles producidos por los faltantes, que contribuyen a la fractura del piso original por la carga de las pisadas.

## 6.2.5 Elaboración y aplicación del mortero

Conforme a los resultados del estudio experimental, se expone a continuación la metodología a emplear para la elaboración del mortero seleccionado IASR5; describiendo la recolección de los materiales, su procesado y la técnica para una correcta aplicación.

### 6.2.5.1 Obtención de las materias primas

#### *Cal*

La cal empleada en este estudio se obtuvo en forma de “terrones” de cal viva de una calera local ubicada en San Benito. Para realizar todo el proceso de elaboración, la cal debe obtenerse viva, es decir recién calcinada para que no haya comenzado el proceso de carbonatación. Siempre que la cal sea local (para evitar diferencias compositivas) y producida artesanalmente en horno de piedra, podría emplearse para la producción del mortero seleccionado.

### *Sascab*

Se obtuvo de la población de Paxcamán, cercana a las ruinas de La Blanca. Dado que la diferencia compositiva entre canteras de *Sascab* puede ser notable, se recomienda emplear en la medida de lo posible el *Sascab* estudiado. Antes de ser empleado debe lavarse con agua limpia para eliminar posible materia orgánica, y cernirse después para eliminar gravillas.

### *Pixoy (Guazuma Ulmifolia)*

El árbol de Pixoy empleado para la extracción de cortezas se encuentra ubicado a las afueras del sitio arqueológico, en el margen izquierdo del camino de tierra que conduce a la aldea de La Blanca. Para no debilitar demasiado a este ejemplar, sería conveniente explorar otras zonas del sitio con el propósito de localizar otros ejemplares de Pixoy y poder repartir y/o alternar la extracción de sus cortezas. La extracción se realiza por corte directo de la corteza mediante machete (u hoja afilada similar) extrayendo secciones de ésta, que normalmente comprenden la corteza y parte del *cambium*.

### *El agua*

El agua a emplear debe ser natural, no clorada. Se recomienda utilizar agua de la laguna próxima al sitio, o bien recoger agua de lluvia.

Aunque las materias primas que han sido empleadas en esta investigación son de ámbito local, no han sido proporcionadas íntegramente por el sitio arqueológico. Tanto el *Sascab* como la cal no se extrajeron de La Blanca por no contar con canteras localizadas ni horno para la quema de la cal. La autogestión de recursos para producir el propio mortero en La Blanca sería el siguiente paso y la meta a la que aspirar, para que la conservación del sitio arqueológico fuera totalmente sostenible. En 2016, se realizó *in situ* una pira experimental para quemar la piedra caliza empleando una trinchera. Aunque la prueba no fue exitosa<sup>1</sup>, se obtuvieron datos valiosos sobre la viabilidad de producir cal en el sitio<sup>2</sup>. En primer lugar la caliza se calcinó durante 6 horas tapada con hojas de palma, quedando la piedra cruda (Fig. 6.4). En el segundo intento, se añadió el doble de leña y se calcinó durante 12 horas tapado con plancha metálica; obteniendo un conjunto de piedras cocidas irregularmente. A pesar de no conseguir la producción de óxido de calcio, con esta prueba se pudieron entender los requisitos técnicos básicos para llevar a cabo una producción pequeña de cal en el sitio sin necesidad de construir un horno de estructura fija.

<sup>1</sup> Se realizaron dos intentos en los cuales se obtuvo una piedra parcialmente calcinada, no observándose reacción al contacto con el agua. De esta prueba se dedujo la necesidad de mayor tiempo de cocción así como una mejor selección y preparación de la piedra caliza.

<sup>2</sup> La trinchera experimental fue diseñada con las indicaciones del Arquitecto Raúl Noriega y llevada a cabo con la ayuda de los vigilantes de seguridad del sitio (Salomón Rosado y Maynor Olivares), quienes compartieron sus conocimientos para la selección de la piedra caliza, la tala de la leña, y la excavación de la trinchera.



Fig. 6.4 Secuencia. Prueba experimental de quema de piedra caliza en La Blanca. Temporada de campo 2016.

#### 6.2.5.2 Apagado de la cal

Puesto que el mortero seleccionado adiciona la goma del Pixoy en el agua del mortero, primero se deberá apagar la cal viva con agua. Para ello, los terrones de óxido de calcio se colocarán en cubetas metálicas o bien en piletas fabricadas *in situ* para tal fin, con el objetivo de que soporten la reacción exotérmica generada. Si son muy grandes pueden partirse para facilitar y agilizar el apagado. El agua debe añadirse en varias veces para optimizar la calidad de la cal, (respetando la medida estequiométrica para no ahogar la cal), por lo que se añadirá un poco de ésta sobre los terrones y se dejará unos minutos, observando el hinchamiento de la cal y la producción de calor. Una vez se haya llegado a la temperatura máxima (sobre 110-120°, que puede medirse con un termómetro), se irá añadiendo más agua y espesando la mezcla. Para la conservación y añejado de la cal se añade agua hasta cubrirla, evitando así la carbonatación por contacto con el  $\text{CO}_2$ . Como se vio en el bloque anterior (Capítulo 3), el correcto apagado de la cal puede depender de varios factores, por lo que es recomendable que madure al menos durante 20 días para garantizar la transformación en hidróxido de calcio.

### 6.2.5.3 Maceración de las cortezas

El macerado de las cortezas debe prepararse tres días antes de emplear el mortero debido a que su rápida descomposición no permite reservarlas durante mucho tiempo. Por ello, cuando la cal haya reposado lo suficiente y esté lista para emplearse se pueden extraer las cortezas del Pixoy. Inmediatamente después de extraerlas deben ponerse a macerar para evitar que comience la oxidación de las gomas. Para extraer el máximo porcentaje de goma es mejor cortar las cortezas en trozos más pequeños. Se introducen en agua corriente a temperatura ambiente, evitando el sol directo, dejándolas macerar entre 48 y 72 horas (no se recomienda más tiempo puesto que comienza a corromperse el agua). Tras este tiempo las cortezas se desechan y el agua se cuele por un tamiz para separar fibras vegetales u otros restos orgánicos.

### 6.2.5.4 Dosificación del mortero

Para su elaboración se mezclará la cal apagada (sólo la pasta, evitando que contenga agua) con el *Sascab* en proporción de 1:3 volúmenes. Estos materiales se mezclan hasta conseguir una consistencia de “migas”. Seguidamente se añade poco a poco el agua de la maceración a razón de 1 volumen más (puede que necesite un poco menos), y se mezcla bien hasta conseguir una pasta bastante densa<sup>3</sup>. Hay que evitar que quede demasiado líquida pues le restaría resistencia al estuco final. Este mortero ya está listo para usarse y puede conservarse por varios días si se introduce en una cubeta plástica hermética, evitando su contacto con el CO<sub>2</sub>.

### 6.2.5.5 Aplicación del mortero

Una vez seleccionadas las zonas y el modo a intervenir y limpias todas las superficies, se procederá a la aplicación del mortero preparado. Las recomendaciones para su aplicación son:

- o Humectar previamente las superficies de contacto, tanto el soporte pétreo como el estuco, para evitar que el soporte absorba el agua del mortero y éste se quede frágil y descohesionado.
- o Aplicar el mortero en cantidades manejables mediante espátula pequeña para evitar daños en el estuco original.
- o En lagunas o zonas extensas, aplicar el mortero por capas con un grosor comprendido entre 0,5-1 cm; para evitar la aparición de grietas. Si se necesita más grosor, aplicar otra capa dejando un tiempo de espera para que el mortero inferior esté en estado mordiente.
- o En los perímetros de refuerzo se debe trabajar el mortero con la espátula, apretándolo contra la superficie para compactarlo y evitar agrietamientos y/o desprendimientos. En zonas más extensas alisarlo mediante espátula o llana y fratarlo<sup>4</sup> para que quede compacto y con la superficie homogénea.

<sup>3</sup> Para saber si la pasta es lo suficientemente firme debe poderse cortar con una espátula sin que la masa vuelva al sitio, y mantenerse adherida a la espátula si la ponemos boca abajo.

<sup>4</sup> Para este fin se experimentó con el fruto del corozo, madera, piedra y cerámica, dando todos buenos resultados (Lorenzo 2011). Si se tiene acceso también puede emplearse un fratás; herramienta específica para este propósito.

- o Si durante la aplicación del mortero se evidencia un secado excesivamente rápido por la absorción del líquido contenido, se puede pulverizar agua macerada sobre éste mientras se trabaja.
- o Las uniones entre el estuco y el mortero de reintegración deben realizarse al mismo nivel, evitando dejar escalones para evitar la acumulación de depósitos orgánicos o el debilitamiento del estuco original. Aunque se encuentren nivelados, la distinción de la zona intervenida será clara por la diferencia de textura entre la superficie del estuco original y la del nuevo mortero.
- o Una vez aplicado y trabajado, se debe observar que no aparecen grietas durante el fraguado, y volver a fratar en caso de notar pequeños agrietamientos superficiales.
- o En la reintegración de superficies horizontales, como las banquetas, no se debe apoyar ni dejar peso durante el fraguado (al menos 72 horas); y esperar al menos 28 días para transitar sobre un piso reintegrado, para garantizar que el proceso de carbonatación y endurecimiento del mortero se ha producido.

## 6.3 Conservación y mantenimiento

Una vez restaurados los estucos y cumpliendo dicho principio anteriormente descrito (UNESCO 1990), es imprescindible que se cumpla un programa de mantenimiento adecuado del sitio para garantizar el funcionamiento y la eficacia de la intervención, así como la estabilidad de los estucos a largo plazo. En caso contrario, el estado de estos materiales podría verse gravemente dañado en poco tiempo, produciéndose incluso pérdidas irreversibles, desmereciendo todo el esfuerzo y tiempo empleado. Las pautas de mantenimiento básicas que deben ser constantemente verificadas en el sitio para garantizar la conservación de los estucos tras la intervención son:

### 6.3.1 Drenaje y limpieza del sitio

Deberá estudiarse el sistema de evacuación y canalización del sitio arqueológico para garantizar el encauzamiento o drenaje de las aguas (López-Menchero 2010), evitando el encharcamiento tanto en la base como en las plazas y pasillos de la Acrópolis y en las estancias expuestas de la subestructura. De este modo se evitaría una acumulación en exceso de agua que termina llegando por capilaridad a los paramentos que conforman las estancias, donde se ubican los estucos (Fig. 6.5).



Fig. 6.5 Vista desde 6J1-3, 2008. Encharcamientos en la plaza de la Acrópolis debido a los desniveles existentes en la misma. Fig. 6.6 Cuarto 6J1-5. Entrada excesiva de agua en la estancia debido a la falta de gran parte del muro este (fondo) y a la poca proyección de la cubierta por este lado.

### 6.3.2 Control y reposición de cubiertas

La protección de las ruinas expuestas mediante cubiertas es imprescindible para la conservación de los estucos. Éstas, aunque están abiertas perimetralmente, protegen los estucos de las radiaciones solares, del agua de lluvia y del viento principalmente, creando un ambiente moderadamente estable, en el que los estucos llegan a estabilizarse. Actualmente las cubiertas que se construyen en la mayoría de sitios del área maya están realizadas con hoja de palma, materiales perecederos que necesitan un mantenimiento constante, pues se ven muy afectadas por el agua. Por ello, es conveniente que estas cubiertas se construyan con palma de Guano (*Sabal Morrisisana*), que resulta mucho más duradera que otra especie de palmera, y se realice un monitoreo periódico de zonas claves de la cubierta como las uniones entre vertientes o las partes bajas del techado. Cuando se observe un fallo puntual en una cubierta debe ser reparado rápidamente, aplicando un parche parcial para evitar que este daño avance y se empiece a filtrar agua de lluvia. Si los fallos que se observan se extienden a varias zonas de la cubierta, debería considerarse la necesidad de ser reemplazada en su totalidad.

Otra cuestión importante a considerar en la revisión de las cubiertas es si cumplen correctamente su función. A la hora de construir estos techados se debe tener en cuenta que cubran ampliamente las ruinas, pues una cubierta con poca proyección no ofrece protección a la zona externa de los muros del edificio, que se ven afectados por la lluvia dirigida y las radiaciones solares a determinadas horas del día. Aunque parezca que los estucos interiores están a salvo, tanto el agua de lluvia como el calor que recibe la parte externa del edificio se transmite por capilaridad hacia el interior de los muros (Fig. 6.6-6.9).





Fig. 6.7 Cubierta de guano con grave deterioro en el vértice superior por donde a demás de la lluvia, se filtran las radiaciones solares. Fig.6.8 Proceso de realización de la gran cubierta del ala oeste de la Acrópolis tras su excavación en 2009.



Fig. 6.9 Cuarto 6J2-4 en 2008 y 2016; la primera cubierta de protección era pequeña, por lo que el edificio quedaba exhibido a la lluvia, desencadenándose la proliferación de microorganismos en las zonas más expuestas. Tras la modificación de la cubierta, con más proyección y altura, no se han vuelto a producir estos daños biológicos.

### 6.3.3 Limpieza y reposiciones periódicas

Una vez restaurados los paramentos de estuco, deben ser revisados periódicamente para poder detectar posibles alteraciones y poder localizar y subsanar las causas. Además del control del estado de conservación, es conveniente realizar limpiezas mecánicas mediante cepillado superficial, para eliminar cada cierto tiempo depósitos arenosos y restos orgánicos vegetales y animales, que promueven la proliferación micro y macrobiológica. Por ello también se debe recoger todo tipo de materia orgánica y arena que se acumule sobre las superficies horizontales de las estancias (muros, suelos y banquetas), barriendo periódicamente estas zonas.

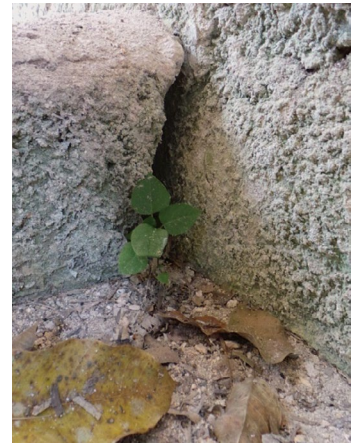


Fig. 6.10 Acumulación de tierra, piedras de derrumbe y hojas secas de la cubierta sobre la banqueta del cuarto 6J2-11.  
Fig. 6.11 Esquina con acumulación de materia orgánica que ha propiciado la germinación y desarrollo de una planta vascular.

De esta forma se evita en gran medida el depósito de semillas transportadas por el viento y el desarrollo de éstas. Si se detecta el crecimiento de plantas mayores, deben ser eliminadas rápidamente para evitar su crecimiento y arraigamiento sobre el material calizo.

Las reposiciones de mortero de reintegración deben realizarse si durante las revisiones periódicas se constatan signos de deterioro en ellos como separación del soporte o pulverulencia. Hay que tener en cuenta que el mortero de reposición que se aplique en algunas zonas, como las franjas bajas de los paramentos, está concebido como un estrato de sacrificio que manifestará los efectos derivados de la humedad y cristalización de sales en su detrimento. Si este mortero de reposición deteriorado termina por desprenderse, el estrato pétreo subyacente comenzará a verse afectado. Por ello, cada cierto tiempo, es posible que deban reemplazarse, eliminando cuidadosamente los restos del mortero de sacrificio y volviendo a aplicar una capa de mortero como se describió anteriormente.



### 6.3.4 Vigilancia

Como recomendación final pero no menos importante es imprescindible que el sitio arqueológico cuente con una vigilancia constante y eficaz. Sobre decir que esta labor resulta ineludible para garantizar el éxito de la intervención y el correcto mantenimiento del sitio. Las labores de vigilancia deberían estar encaminadas al control de las ruinas, mediante la revisión diaria de todas las estancias y áreas del sitio y la comunicación de posibles alteraciones ocurridas, como desprendimientos en las estructuras, acumulaciones excesivas de agua, daños graves en las cubiertas u otras incidencias extraordinarias que deban ser subsanadas. Además se debe controlar las acciones de las personas visitantes del sitio, procurando siempre la protección de las ruinas frente a agresiones antrópicas sobre las construcciones y sus revestimientos de estuco.



# CONCLUSIONES FINALES

Los estucos de revestimiento que emplearon los antiguos mayas para el acabado de sus construcciones, se presentan ahora como materiales bastante frágiles a pesar de sus elementos constitutivos ( $\text{CaCO}_3$ ) y de la gran calidad técnica de su ejecución. Estos revestimientos, que en origen sirvieron para materializar ideas, símbolos, conceptos e historias, se han visto gravemente afectados en el transcurrir del tiempo, agredidos por multitud de factores, naturales y antrópicos, que se desarrollaron generalmente en varias etapas:

- o En primer lugar el abandono sufrido desde la desocupación de la ciudad, provoca su exposición a las condiciones climáticas, el crecimiento masivo de la vegetación sobre las construcciones y el deterioro de la arquitectura con el consecuente derrumbe de las bóvedas. En esta etapa el estuco sufre gravemente y de forma brusca, produciéndose la pérdida casi total del revestimiento exterior de las construcciones y de gran parte del revestimiento interior, conservándose solamente las áreas de estuco que han quedado sepultadas bajo la línea de derrumbe.
- o Tras la conquista española, muchas ciudades o asentamientos mayas, que ya se encontraban abandonadas, se fueron redescubriendo en los siglos posteriores, atrayendo a viajeros y exploradores. El interés y la curiosidad por lo exótico y desconocido, así como la ausencia de protección legal de este patrimonio, en un territorio desterrado y castigado, propiciaron la destrucción de numerosas manifestaciones artísticas como estelas, altares, relieves arquitectónicos o pinturas murales, que fueron saqueadas y extrahidas principalmente con fines lucrativos.
- o Este patrimonio, gravemente mermado, se ve en última instancia, sometido a un fuerte estrés físico-mecánico derivado de la excavación arqueológica. Con la exhumación, los materiales compositivos son expuestos a nuevas condiciones de humedad, temperatura, luz y oxígeno, ocasionándose multitud de reacciones internas en su intento de adaptarse al nuevo medio, generándose rápidamente patologías visibles.

Estas etapas han tenido lugar también en el sitio arqueológico La Blanca, objeto de estudio. En las sucesivas campañas de trabajo *in situ* que se han llevado a cabo, se ha comprobado la alteración de los estucos a lo largo del tiempo, sobretodo desde el momento de su exposición tras la excavación. Por ello, han sido imprescindibles las tareas de protección de las estancias mediante cubiertas, como primera medida de conservación. En segundo lugar, las acciones encaminadas a devolver la estabilidad a los recién liberados revestimientos han sido determinantes para mitigar el deterioro y garantizar su conservación. Pero de la práctica de estas labores, han surgido muchos interrogantes, cuestionándonos a menudo cuáles eran los mejores productos o materiales para llevar a cabo la consolidación y estabilización de estos estucos sin producir efectos adversos en ellos, y salvando los impedimentos que suponen el transporte y coste de productos. El empleo de recursos naturales y de técnicas populares se presentaba como una buena alternativa, que además cumplía a la perfección los criterios fundamentales de compatibilidad, reversibilidad y mínima intervención.

Esta conjetura encajaba además en la línea de las nuevas corrientes en el campo de la restauración arqueológica en área maya, que se comenzaron a plantear ya en los años 60 del pasado siglo XX, y a desarrollar en la práctica hacia finales de ese mismo siglo; priorizándose la utilización de materiales tradicionales, y más específicamente, de aquellos que se comenzaron a conocer gracias a la mayor accesibilidad a equipamiento adecuado para realizar diferentes

análisis compositivos y cuantitativos en muestras reales de estuco. Gracias a esta tendencia, se frenó cuantiosamente la práctica de aplicar, productos sintéticos en las tareas de conservación con ninguna afinidad a los materiales compositivos del estuco, y ninguna estabilidad en las condiciones ambientales extremas que se dan en estos enclaves arqueológicos, y que en un periodo de tiempo relativamente corto, demostraron los graves daños que podían ocasionar.

La presente investigación se ha desarrollado partiendo de la hipótesis de que la recuperación y el empleo de las antiguas técnicas mayas para la elaboración de estucos de revestimiento, pueden ser aplicadas en el campo de la conservación y restauración de sitios arqueológicos del área maya, y concretamente en el sitio arqueológico La Blanca, como una alternativa a los productos comerciales específicos, compatible y sostenible.

Bajo esta premisa, se ha desarrollado una metodología de trabajo que comprende tanto la actuación en campo, en el contexto de las campañas anuales de investigación del Proyecto Arqueológico La Blanca, como de laboratorio, donde se ha llevado a cabo el estudio experimental.

Para ello, ha sido determinante el trabajo realizado *in situ* a lo largo de más de doce años, ya que ha contribuido al conocimiento exhaustivo del estado de conservación de sus estucos, las causas de alteración que intervienen desde el momento de la excavación, y los mecanismos de desarrollo de las patologías. También nos ha ayudado a comprender las necesidades y requisitos indispensables para su estabilidad, como elementos de protección o acciones de mantenimiento, así como a conocer los recursos naturales accesibles y disponibles en el entorno del sitio.

Los análisis químicos realizados por el Proyecto (Doménech y Vázquez de Ágredos: 2006) y a los que hemos tenido acceso, nos han permitido conocer con exactitud los elementos compositivos de las muestras de estuco de algunas estancias de la Acrópolis de La Blanca, y esta información junto a la investigación teórica han determinado los materiales y técnicas a ensayar.

El estudio de las fuentes históricas y etnográficas así como de diferentes investigaciones científicas ha sido imprescindible para generar el marco teórico que fundamenta la selección de los materiales, los procesos y las técnicas estudiadas. De esta fase de revisión bibliográfica se ha podido concluir que:

- o Los estucos mayas son compuestos calcíticos elaborados con un conglomerante (la cal aérea) y cargas inertes de composición mayoritariamente calcítica, siendo el árido más empleado el *Sascab* (arena blanca). Si bien se han hallado estucos con elementos añadidos de origen volcánico, como vidrio o cenizas, que podrían propiciar reacciones puzzolánicas o de hidráulidad, no es el caso de los estucos de La Blanca.
- o Las técnicas de apagado de la cal mencionadas en la bibliografía son varias y distintas, y podrían haber estado sujetas a una cuestión geográfica. El sistema de apagado del que existe una constancia más clara, es el apagado de la cal por pudrición (o exposición a cielo abierto), que pudo haberse localizado en las Tierras Bajas del sur, y que actualmente sigue en uso. Por otra parte, se habla del apagado de la cal por inmersión en agua, si bien este sistema se describe en algunas fuentes etnográficas como el apagado por mezclado en caliente (Hot Mix), ya que se detalla el proceso de mezclar el árido con la cal viva primero, y posteriormente se añade la cantidad justa de agua, integrándose hasta formar la pasta del mortero.

- o Fuentes coloniales apuntan el empleo de gomas vegetales, extraídas de las cortezas de algunos árboles, como aditivos de estas pastas de cal. Aunque esta afirmación ha sido comprobada científicamente por la presencia de fibras vegetales y azúcar en numerosas muestras de estuco; no ha sido posible revelar la especie o especies arbóreas empleadas debido a la degradación de estos compuestos orgánicos.
- o Estas gomas, extraídas por remojo en agua de las cortezas, se añadían en el estuco empleando dicha maceración para el apagado de la cal, lo cual según distintas investigaciones, mejoraba las propiedades finales del estuco. Además, las maceraciones de estas cortezas se aplicaron también en el aplanado y bruñido final del estuco sobre su soporte arquitectónico, dotándolo de cierta impermeabilidad y de mayor dureza.

Con la información obtenida tanto del trabajo en campo como de la revisión bibliográfica, se pudo establecer una metodología de investigación en la que se aplicaran los conceptos teóricos en la fase experimental. Los grupos de mortero seleccionados para la fase experimental han sido tres:

- o Grupo técnico 1: Cal apagada por inmersión. Este grupo se ha subdividido en dos: 1a-Apagado de la cal en la maceración de las cortezas, con añadido de agua de maceración en la formación del mortero, y 1b- apagado de la cal por inmersión en agua, con añadido de agua de maceración en la formación del mortero.
- o Grupo técnico 2: Cal apagada por pudrición. Apagado de la cal a cielo abierto con añadido de agua de maceración en la formación del mortero.
- o Grupo técnico 3: Cal apagada por mezclado en caliente (Hot Mix). Apagado de la cal mezclada con el árido con el agua de las maceraciones y añadido de agua de maceración en la formación del mortero.

Cada grupo técnico a su vez se divide en dos subgrupos: Los realizados con *Sascab* y los realizados con arena blanca del sitio arqueológico. Y a su vez en tres variantes: Realizados con maceración de Habín, de Ramón y de Pixoy, en dos concentraciones; al 0,5% y al 2%. Los diferentes morteros realizados con estas cuatro variaciones técnicas (modo de apagar de la cal, tipo de árido, tipo aditivo vegetal y concentración), se han sometido a ensayo con el objetivo principal de caracterizarlos y determinar su durabilidad frente a distintos agentes de deterioro.

De los ensayos de caracterización física se ha podido concluir que los morteros de los subgrupos realizados con *Sascab* presentan una actividad hídrica menor, con una absorción y desorción de agua mas lenta y gradual, que sus variantes realizadas con arena del sitio. La menor absorción de agua se debe a una estructura de mayor densidad y compactación, con la presencia de pocos espacios accesibles al agua, resultado de un árido con una granulometría pequeña y regular. Este hecho queda constatado claramente en el test de carbonatación, donde las variantes realizadas con *Sascab*, independientemente del grupo técnico, muestran un estado ralentizado de la carbonatación, con la presencia de tinción violeta en forma de anillos, sinónimo de la presencia de hidróxido de calcio. Los morteros realizados con arena y las probetas patrón (sin aditivos vegetales) se muestran casi carbonatados en su totalidad en el mismo tiempo de curación.

De los ensayos de caracterización mecánica se puede concluir que todos los grupos técnicos presentan una adherencia baja al soporte (de menos de  $0,31\text{N/mm}^2$ ), pero mantienen una buena cohesión interna del mortero durante la tracción, produciéndose mayormente rotura adhesiva tipo A en los grupos 1 y 3. Los morteros del grupo 2, realizados con la cal apagada por pudrición (PA-PS) son mecánicamente menos resistentes que los demás grupos técnicos, obteniéndose generalmente roturas cohesivas (B), que indican un valor de cohesión interna menor que de adhesión al soporte. Del mismo modo, la superficie de estos morteros es más blanda y susceptible a la abrasión, así como a la compresión por su baja densidad. Así mismo, los grupos 1a y 3 (IMA, IMS, HA y HS) presentan una resistencia a la compresión y a la abrasión muy altas, lo que implica la formación de un mortero muy duro y fuerte. Por otra parte, los morteros del grupo 1b tienen una resistencia intermedia, ni tan baja como el grupo 2 ni tan alta como el 1a y 3; por lo que se revelan como los mejores candidatos.

En cuanto a la estabilidad frente a los agentes de degradación, podemos decir que todos los morteros presentan una resistencia baja a la cristalización de sales, ya que los ciclos soportados se sitúan entre los 4 y 6 generalmente, si bien los morteros realizados con arena y con el porcentaje mayor de aditivo en los grupos 1a y 1b, presentan una resistencia significativamente mayor. La estabilidad cromática es buena en general, si bien los cambios pueden considerarse perceptibles. Los grupos más estables son 1a y 1b, tanto los subgrupos realizados con *Sascab*, como los realizados con arena blanca, que presentan pocos cambios (por debajo de 4 unidades  $\Delta E^*$ ). Los grupos más inestables corresponden al 2 y 3, que presentan un incremento de color total de más de 4 unidades  $\Delta E^*$ . Las probetas patrón de cada grupo, realizadas sin aditivos se mantienen muy estables y sin apenas variaciones, por lo que se puede afirmar que los aditivos orgánicos añadidos al mortero son sensibles a la irradiación de luz ultravioleta, produciendo la variación cromática en mayor o menor medida.

Tras realizar los envejecimientos acelerados mediante ciclos de humidificación y secado se ha comprobado que el comportamiento hídrico de las probetas es similar al de antes del ensayo; aunque se advierte un descenso general en el índice de absorción de agua por capilaridad y a presión atmosférica, además de un ligero aumento de la permeabilidad al vapor de agua, se puede decir que las propiedades hídricas de los morteros no se han visto apenas alteradas.

A pesar de los resultados concluyentes de este estudio, debemos ser conscientes de que en las condiciones reales de exposición existen diversos factores condicionantes que pueden interferir en dicho comportamiento y variar los resultados obtenidos en laboratorio. En primer lugar, las probetas de mortero empleadas en los ensayos tienen un tamaño normalizado, con mayor grosor que el mortero que se vaya a aplicar *in situ*, lo cual puede interferir en el comportamiento hídrico y mecánico de éste. Las condiciones ambientales del laboratorio son bastante distintas a las reales, lo que pueden influir también en factores como la absorción de agua o la permeabilidad al vapor de agua y por otra parte, el mortero que se aplique en el sitio, se hará sobre el soporte pétreo original, que cuenta con un avanzado estado de deterioro y que sus productos de deterioro (como sales) pueden transmitirse rápidamente al nuevo material, generando un aceleramiento del deterioro en el nuevo mortero de reintegración.

Para resolver estas cuestiones se ha llevado a cabo el estudio de estabilidad *in situ*, con el objeto de estimar el envejecimiento de los morteros estudiados una vez aplicados en el soporte original y en las condiciones climáticas reales, y poder establecer una comparativa entre ambas vías de estudio experimental. Los resultados de este estudio, llevado a cabo entre 2013 y 2018, han sido determinantes para la selección final del mortero a emplear ya que se han podido descartar rápidamente los grupos que no han funcionado bien, como el grupo 2, cuyos morteros se han desprendido en su mayoría, en un periodo inferior a un año.

La selección del mortero ideal para ser empleado en las labores de conservación de La Blanca no ha resultado una tarea fácil ya que el comportamiento entre grupos ha estado reñido, contando en muchos ensayos con resultados bastante aproximados y positivos. Ha resultado determinante en estos resultados el tipo de árido empleado, notándose una mejora general de las propiedades en los subgrupos realizados con *Sascab* (reducción de la absorción de agua principalmente), debido a la morfología que proporciona al mortero final reduciendo la porosidad y propiciando mayor unión y compactación de las partículas.

Finalmente se ha seleccionado el mortero IASP5 por reunir las cualidades más afines a los estucos de La Blanca y cumplir con los principios fundamentales de toda intervención arqueológica:

- o Comportamiento hídrico óptimo, baja absorción de agua, pero buena desorción y permeabilidad al vapor.
- o Propiedades mecánicas moderadas; con buena adhesión al soporte y con resistencia media a la abrasión superficial y a la compresión, lo que garantiza que el mortero no es más duro que el estuco o la piedra original, y que su reversibilidad es segura.
- o Buena estabilidad cromática frente a las radiaciones lumínicas, con pocos cambios de color, por debajo de lo perceptible, y con tendencia al aclaramiento tonal, lo que nos asegura que una vez aplicado *in situ*, el color no variará demasiado y en todo caso tenderá a aclararse, siendo distinguible en todo momento la intervención del estuco original.
- o Buena estabilidad frente a los cambios de temperatura (choque térmico) y de humedad.
- o Buena estabilidad al envejecimiento natural (en buen estado tras cinco años).
- o Buena trabajabilidad y elevada plasticidad del mortero en estado fresco.
- o Bajo impacto ecológico al contener Pixoy como aditivo orgánico, ya que de su corteza se extrae una cantidad significativamente mayor de goma que del árbol del Habín o del Ramón, con lo que para su preparación se necesita obtener menor cantidad de corteza.

La selección de este mortero en concreto atiende como se ha dicho, a la afinidad con los requisitos planteados, pero ello no quiere decir que el resto de morteros estudiados no sean válidos o se descarten. Como se ha podido comprobar en la fase experimental, la mayoría de los morteros del grupo 1a y del grupo 1b (cal apagada por inmersión, tanto apagada con agua como con el agua de las maceraciones, y en sus dos subgrupos con *Sascab* y con arena del sitio), han mostrado resultados bastante buenos y similares tanto en laboratorio como *in situ*. La poca diferencia en el comportamiento de los morteros a nivel de aditivos, o al menos entre los morteros realizados



con Habín y con Ramón, podría deberse a que comparten una composición más similar. Por su parte, el Pixoy si que ha mostrado mayor variabilidad en algunos ensayos (como en la absorción de agua, o en la estabilidad del color), que podrían deberse a una composición con mas contenido en azúcar y/o mayor poder adhesivo. Esta característica ya se pudo observar en el momento de la extracción de la goma por cocción de las cortezas, al generarse un exudado mucho mas denso, pegajoso y de fuerte tonalidad rojiza.

En este sentido, cabe destacar también el buen comportamiento de los morteros patrón, realizados sin aditivos, ya que han demostrado poseer buenas propiedades mecánicas y de durabilidad, si bien los coeficientes de absorción de agua son comparativamente mayores. Este resultado nos aporta la tranquilidad de saber que los morteros de refuerzo que hasta ahora se han aplicado en La Blanca, y que en su mayoría estaban realizados con cal apagada y *Sascab* o árido local, sin ningún aditivo, son compatibles con los estucos originales y su presencia no entraña ningún peligro para éstos.

De forma concluyente se ha podido comprobar la buena respuesta de los morteros examinados frente a los distintos ensayos y envejecimientos, debido en primera instancia a la nobleza de la materia prima y a la compatibilidad de ésta con el soporte pétreo y las condiciones climáticas del enclave. Pero la “reproducción” de estas técnicas mayas debe ser considerada sólo como una aproximación. A pesar de todos los estudios bibliográficos, de los cada vez más estudios analíticos y también experimentales para reproducir estas técnicas ancestrales, somos conscientes de que es prácticamente imposible conocer con exactitud los elementos y procesos con que se elaboraron estos estucos, y que toda investigación experimental realizada supone sólo un acercamiento a estas técnicas. Por una parte, las fuentes escritas coloniales que se han conservado hasta nuestros días, hacen referencias escasas y puntuales a la elaboración de estos revestimientos, con lo que contamos con un parco punto de salida. Por otra parte, los exhaustivos análisis de caracterización química realizados hasta la fecha han desvelado diversidad de componentes inorgánicos y también distintos compuestos orgánicos en los estucos. Pero parte de estos elementos orgánicos que ahora detectamos, pueden ser el producto de distintos cambios químicos en la estructura interna del estuco debido al deterioro. Además, desde el mismo momento de su elaboración, se producen una serie de reacciones químicas por la transformación de la cal viva en hidróxido de calcio al apagarse, y en carbonato cálcico al curarse el mortero. La cal, de gran poder cáustico puede influir en la transformación de los elementos integrantes, por lo que al analizarse químicamente las muestras de estuco, no pueden ser comparados con los elementos en estado crudo.

Además de los ingredientes exactos del estuco, existen numerosos condicionantes que pueden variar su resultado final, su comportamiento y su durabilidad. Las especies vegetales concretas para extraer los aditivos, el modo de extraerlos, las proporciones exactas, la preparación o acondicionamiento de los materiales, el orden de los factores, los tiempos de espera, la climatología, la forma de trabajar las pastas, las herramientas concretas, el momento de la aplicación, la manera de bruñir, etc., forman una larga lista de factores determinantes; de ingredientes secretos de las fórmulas magistrales con las que los artesanos mayas lograron la máxima calidad técnica. Recetas transmitidas de generación en generación, de maestros a aprendices, que fueron desapareciendo y de las que no tenemos constancia.

Conjuntamente, debemos tener en cuenta que el entorno en el que estos estucos fueron aplicados en origen ha sufrido variaciones hasta la actualidad. Empezando por el soporte pétreo sobre el que se asientan. Este soporte, formado por los sillares calizos recién extraídos de cantera, se encontraba recién construido en el momento de la aplicación de los estucos de revestimiento. Los morteros que ahora empleamos en las labores de conservación se aplican sobre este mismo soporte, pero generalmente en un avanzado estado de deterioro, que afecta en mayor medida al comportamiento y envejecimiento del nuevo mortero. Por otra parte, es importante señalar la variación en las condiciones climáticas del área, puesto que es posible que las actuales sean distintas a las condiciones con las que contaban los mayas en el momento de la construcción de sus ciudades. El calentamiento global que sufre hoy día el planeta, la contaminación y la deforestación, concretamente en el área maya, supone un cambio en el sistema ecológico y en la climatología; con variación de las precipitaciones, de la temperatura, de la humedad y de las radiaciones solares. Factores de deterioro cuya oscilación puede ser determinante en el proceso de intemperismo y la durabilidad de los materiales.

Con todo ello, es inviable pensar que se puede conseguir un producto con la excelencia del estuco maya, que se comporte del mismo modo y que tenga idéntica durabilidad. Pero lejos de este propósito, lo que sí ha permitido esta investigación es corroborar y garantizar la idoneidad de ciertos tipos de mortero, elaborados con materia prima local, en las labores de conservación y restauración de sitios arqueológicos del área maya. Finalmente, se han estipulado una serie de lineamientos básicos para poder aplicar esta investigación de forma real en La Blanca. Estas acciones, definidas en el capítulo 6, quieren contribuir a que la conservación de estas manifestaciones artísticas no se quede en un episodio puntual, sino que la intervención sea sostenible y se pueda garantizar su mantenimiento a largo plazo.

Además de por su compatibilidad con el material original, la intención de recuperar las técnicas y materiales tradicionales es un llamado de atención ante el cada vez más extendido empleo de productos comerciales, listos para ser usados. Hemos sido testigos de primera mano de cómo el oficio de elaborar cal ha ido en disminución en apenas doce años. Al comienzo de esta investigación, era fácil hallar en una misma localidad varios hornos (artesanalmente construidos con piedra) de producción de cal que proveían a sus habitantes de este material para distintos trabajos, entre ellos los relacionados con la construcción. En 2016, dos de estos hornos que habíamos estado empleando para el suministro de cal ya habían cerrado, y la obtención de la cal para la fase experimental se hizo realmente difícil en el área. El empleo de cal hidráulica comercial o del cemento, así como la sustitución de la madera por bloques de hormigón en la construcción de las viviendas locales, ha supuesto el desuso de la cal aérea tradicional, y por ende, la depreciación de este oficio ancestral.

El empleo de los materiales naturales localizados en el entorno del sitio arqueológico para producir los morteros de reintegración, es una apuesta por la sostenibilidad del sitio. Pero de nada sirve la utilización de estas técnicas especificadas si no se plantea y se cumple un protocolo de mantenimiento a largo plazo. Por ello y para facilitar la conservación de las ruinas, sería favorable conseguir su autogestión para que éste sea capaz de utilizar sus propios recursos y producir sus propios materiales, implicando para ello a la sociedad. De este modo, y como viene realizando el Proyecto La Blanca desde sus comienzos, consideramos imprescindible la concienciación y

sensibilización de la comunidad que lo rodea, propietaria y heredera del sitio, para que pueda establecer vínculos afectivos para con su patrimonio; identificarse con el sitio, preocuparse e interesarse por éste y por su legado y transmisión a las futuras generaciones. Sólo fomentando la apropiación social del patrimonio y el empoderamiento cultural de los bienes se podrá garantizar la implicación de la sociedad y por ende la conservación sostenible del patrimonio.

## Próximas líneas de actuación

Al término de esta investigación, se ha logrado evaluar y seleccionar aquel mortero de reintegración, basado en técnicas tradicionales, más indicado para cumplir los requerimientos de los estucos de La Blanca, que se hallan en determinadas condiciones de conservación y envueltos en unas circunstancias climatológicas específicas. Este resultado es el fruto de un largo periodo de tiempo en el que se ha podido examinar y controlar periódicamente estos revestimientos *in situ* hasta el punto de conocer su comportamiento, los factores que más intervienen en su degradación y las necesidades indispensables para su conservación.

La búsqueda de un mortero adecuado de reintegración ha sido el objetivo principal, pero somos conscientes de que todavía queda un largo camino para que la restauración de los estucos de La Blanca sea una realidad. En este sentido y para llevar a cabo la implementación de esta intervención basada en la fase de experimentación, sería necesaria la aplicación de la metodología que se recoge en el capítulo 6. Esta metodología general deberá ser minuciosamente estudiada y adaptada a cada estancia de La Blanca, puesto que los estucos de revestimiento presentan distintos grados de deterioro y sus requerimientos pueden variar.

Una de las acciones próximas que se debería realizar en cuanto a la materia prima necesaria, es el reconocimiento de los recursos naturales en las inmediaciones del sitio. Sería interesante localizar una o más fuentes de *Sascab* que puedan emplearse en la elaboración de estos morteros de reintegración. De este modo se podrá contar con una variación tonal de los áridos para una mejor integración con los estucos originales, ya que la variedad tonal es amplia, pudiendo encontrar en un área pequeña de estuco distintos matices de color. Igualmente, y con el propósito de encaminar la intervención hacia la sostenibilidad, sería importante localizar las especies arbóreas necesarias para la obtención de los exudados, en este caso el Pixoy, a fin de controlar la extracción moderada de las cortezas precisas. Si en un futuro puede llevarse a cabo la construcción de un horno o “calera” para la producción de cal en el propio sitio arqueológico, sería conveniente también estudiar el entorno para localizar piedra caliza apta para hacer cal. Con ello sería conveniente seguir estudiando las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad de los distintos materiales susceptibles de ser empleados en las intervenciones, ya que los resultados de esta investigación atienden al estudio concreto de ciertos métodos y materias, por lo que es necesario seguir realizando ensayos de caracterización y pruebas experimentales *in situ* que nos aseguren la compatibilidad y durabilidad de los materiales, antes de cualquier intervención.



# BIBLIOGRAFÍA

## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- Altomare, A., Corriero, N., Cuocci, C., Falcicchio, A., Moliterni, A., Rizzi, R.  
2015 *QualX2.0: a qualitative phase analysis software using the freely database POW\_COD*. *Journal of Applied Crystallography*, 48, 598-603. Doi:10.1107/S1600576751002319.
- Altomare, A., Burla, M. C., Giacobozzo, C., Guagliardi, A., Moliterni, A., Polidori, G., Rizzi, R.  
2001 *Quanto. A Rietveld program for quantitative phase analysis for polycrystalline mixtures*. *Journal of Applied Crystallography*, 34, 392-397.
- Angulo, Villaseñor J.  
2003 Restauración de pinturas murales en Teotihuacán o los nuevos murales de Tepantitla. En *La pintura mural prehispánica en México* Año IX nº18 pp.:30-37 Universidad Nacional Autónoma de México.
- Arnaiz, M. y Martín, A.  
1976 *Alteración de materiales pétreos de obras monumentales. Acción de la contaminación ambiental*. Consejo superior de investigaciones científicas Nº 340, Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento. Madrid.
- Balakrishna, M.N., Rahman, M.M., Chamberlain, D., Mohammad, F. y Evans, R.  
2013 *Determination of flow rate of water in concrete by Rilem tube method*. En *International Journal of structural and civil engineering research Vol.II nº 4 pp.:98-109*.
- Barba Pingarrón L.  
2013 El uso de la cal en el mundo mesoamericano prehispánico. En *La cal. Historia, propiedades y usos*. Luis Barba Pingarrón e Isabel Villaseñor Alonso (Eds.) Universidad Nacional Autónoma de México.
- Barca, D., Miriello, D., Barba, L., Ortiz, O., Manzanilla, L.R. y Blancas, J.  
2013 Provenance of glass shards in archaeological lime plasters by LA-ICP-MS: Implications for the ancient routes from the Gulf of Mexico to Teotihuacan in Central Mexico. En *Journal of Archaeological Science* Nº40, pp.: 3999-4008.
- Barrero, M<sup>ª</sup> M.  
2012 *Mejora del comportamiento térmico de los morteros de cal aditivados y su empleo en la rehabilitación de inmuebles*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Cardona, K. y Magnoni, A.  
2007 Manejo de sitios arqueológicos en el área maya: El caso del Parque Arqueológico Kaminaljuyú, Guatemala, y el de Chunchucmil, Yucatán. En *XX Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala*. Laporte, J.P., Arroyo, B. y Mejía, H. (Eds.), pp.:200-213. Museo Nacional de Arqueología y Etnografía, Guatemala.
- Carrascosa, B. y Lastras, M.  
2006 Tratamientos de conservación y restauración del cuarto de los grafitos. En: *La Blanca. Arquitectura y clasicismo*, G. Muñoz Cosme y C. Vidal Lorenzo (Eds.) pp. 79-87. Valencia.  
2007 Conservación *in situ*. Revestimientos interiores de los edificios 6J1 y 6J2. En C. Vidal y G. Muñoz (Eds.) *La Blanca y su entorno. Cuadernos de arquitectura y arqueología maya*, pp. 29-38, Valencia.
- Carrascosa, B. Lastras, M. y Lorenzo, F.  
2009 La conservación de los grafitos de La Blanca. Investigación sobre materiales, procesos y técnicas. En Vidal y G. Muñoz (Eds.) *Los grafitos mayas. Cuadernos de arquitectura y arqueología maya 2*. pp.119-132, Valencia.
- Carrascosa, B. y Lorenzo, F.  
2012 Estudios previos en morteros tradicionales de cal para la evaluación de su comportamiento hídrico y la idoneidad de ser empleados en clima tropical. *Arché* Nº 6-7 Publicación del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio pp: 55-62. Valencia.

**Castellanos, C., E. Monterroso R. y E. Monterroso T.**

2007 Conservación de estuco en el sitio arqueológico El Mirador. En *XX Simposio de Arqueología en Guatemala, 2006* (editado por J.P. Laporte, B. Arroyo y H. Mejía), pp. 163-178. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala (versión digital).

**Castro, M.C., Jáidar, Y., Baglioni, P. y Giorgi, R.**

2013 Nanotecnología aplicada a la consolidación de pinturas murales. Nanopartículas de hidróxido de calcio. En *La cal. Historia, propiedades y usos*, Barba, L. y Villaseñor, I. (Eds.) pp.:234-252, Universidad Nacional Autónoma de México.

**Cazalla Vázquez, O.**

2002 *Morteros de cal. Aplicación en el patrimonio histórico*. Tesis doctoral, Universidad de Granada.

**CEN (Comité Europeo de Normalización)**

1999 UNE-EN 1015:1999 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros de revoco y enlucido. Madrid, Aenor©.

1999 UNE-EN 12370:1999 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de sales. Madrid, Aenor©.

2000 UNE-EN 1015-11 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Determinación de la resistencia a flexión y compresión del mortero endurecido. Madrid, Aenor©.

2000 UNE-EN 1015-12 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Determinación de la resistencia a la adhesión de los revocos para mortero y enlucido, endurecidos aplicados sobre soportes. Madrid, Aenor©.

2004 UNE-EN ISO 9142:2004 Adhesivos. Guía para la sección de condiciones de envejecimiento normalizadas de laboratorio para someter a ensayo juntas pegadas. Madrid, Aenor©.

2005 UNE-EN 13295:2005 Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistencia a la carbonatación. Madrid, Aenor©.

2008 UNE-EN 13755:2008 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica. Madrid, Aenor©.

2010 UNE-EN 15801: 2010 Conservación del Patrimonio Cultural. Determinación de la absorción de agua por capilaridad. Madrid, Aenor©.

2010 UNE-EN 15803-2010 Conservación del patrimonio cultural. Métodos de ensayo. Determinación a la permeabilidad de agua. Madrid, Aenor©.

2010 UNE-EN 1015:10 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido. Madrid, Aenor©.

2011 UNE-EN 15886 Conservación del Patrimonio Cultural. Métodos de ensayo. Medición del color. Madrid, Aenor©.

2013 UNE-EN 14066:2013 Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia al envejecimiento por choque térmico. Madrid, Aenor©.

**Congreso de la República de Guatemala**

1997 *Ley para la protección del patrimonio cultural de la nación. Decreto 26-97*. Guatemala.

**Coimbra, C. A.**

2011 Evaluation of the variability of the Karsten tube in-situ test technique on measuring liquid water permeability of renders and ceramic tile coatings. Instituto superior técnico. Universidad Técnica de Lisboa.

**Cosphey, N.**

2016 Hot mixed lime mortars. Recuperado el 12/2016 en [www.quicklimemortars.com](http://www.quicklimemortars.com)

**Dávila, R.**

2007 Los primeros pasos de la arqueología maya: exploradores y viajeros en el siglo XIX. En: *XX Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala 2006* (J. P. Laporte, B. Arroyo y H. Mejía Eds.), pp.:179-186. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala.

**De Landa, D.**

2002 *Relación de las cosas de Yucatán*. Miguel Rivera Dorado (Ed.) Dastin, Madrid.

**Doehne, E. y Price, C.**

2010 *Stone conservation. An overview of current Research*. The Getty Conservation Institute. Los Ángeles, EE.UU.

**Doménech, M<sup>a</sup> T. Y Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup> L.**

2005 La Caracterización química del color. En *La Blanca*. Arqueología y desarrollo. Muñoz, G. Y Vidal, C. (Eds.), pp.: 127-137. Valencia, *Universitat Politècnica de València*.

2006 Pigmentos, aglutinantes y estucos. Composición químico-analítica. En *La Blanca. Arquitectura y Clasicismo*. Muñoz, G. Y Vidal, C. (Eds.), pp.:131-147, Valencia UPV.

**Doménech, M<sup>a</sup> T., Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup> L. y Vidal, C.**

2007 Los pintores de La Blanca y su entorno. Hacia un proyecto regional. En *La Blanca y su entorno. Cuadernos de arquitectura y arqueología maya*. Vidal, C. Y Muñoz, G. (Eds.),pp.: 105-120. Valencia, UPV.

**Doménech-Carbó, M.T. et al.**

2014 Identification of indigoid compounds present in archaeological Maya blue by pyrolysis-silylation-gas chromatography-mass spectrometry en *Journal of Analytical and applied pyrolysis*, vol. 105. pp. 355-362.

**Esquível, A. y Filloy, L.**

2016 Evaluación del proceso de carbonatación de nanocales aplicadas a pinturas murales prehispánicas de origen maya. En *Intervención año 7, nº 14*. pp.: 31-41 julio-diciembre 2016

**Falcón, T. y Magaloni, D.**

1992 En torno a la conservación de la pintura mural prehispánica. En *Revista de la Universidad de México* Nº 502, pp.:16-20. Noviembre 1992.

**Fuentes, A. y Otero, A.**

2010 La técnica pictórica de los maya al servicio de la restauración de estucos y pintura mural en México. Calakmul: un ejemplo de restauración arqueológica. En *XII Reunió Tècnica. Vers una conservació-restauració sostenible: Reptes i projectes*. Museu nacional d'Art de Catalunya, 3 y 4 de mayo de 2010, Barcelona, España.

**Gárate, I.**

2002 *Artes de la cal*. Madrid, Munilla-Leria.

**García, D. Y Pereira, K.**

2007 ¿A quien le pertenece el pasado? La disyuntiva del Patrimonio Cultural en Guatemala. En *XX Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala*. Laporte, J.P., Arroyo, B. y Mejía, H.(eds.),pp.:113-119. Museo Nacional de Arqueología y Etnografía, Guatemala.



**García, S.**

2009 Referencias históricas y evolución de los plásticos. En *Revista iberoamericana de polímeros* N° 10 (1) pp.: 71-80.

**García, C. García, V. y Vázquez, A.**

2010 Soluciones integrales a la problemática de conservación de los acabados arquitectónicos de Mayapán, Yucatán. En *Intervención* n°2. Julio-Diciembre, México.

**García Solís, C., Mendoza Anaya, D. & Quintana Owen, P.**

2016 La escultura arquitectónica modelada en estuco de Calakmul, Campeche, México: la transformación material en el proceso tecnológico. En *Intervención año 7, n° 14*. pp.: 16-30 julio-diciembre 2016.

**García, V., García, C. Y Valencia, B.**

(s.f) *Chicanná, Campeche. Investigación para la conservación del material pétreo y trabajos recientes de restauración*. Publicaciones del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), Mexico. Recuperado el 2/1/2019 de [https://www.conservacion.inah.gob.mx/publicaciones/wp-content/uploads/2015/09/CorreoRest4\\_Art1.pdf](https://www.conservacion.inah.gob.mx/publicaciones/wp-content/uploads/2015/09/CorreoRest4_Art1.pdf)

**Gillot, C.**

2014 The use of pozzolanic materials in Maya mortars: new evidence from Rio Bec (Campeche, Mexico). En *Journal of Archaeological Science* N°47, pp.: 1-9

**Giorgi, R., Dei, L. & Baglioni, P.**

2000 Nuevo método para la consolidación de pinturas murales basado en dispersiones de cal viva en alcohol. En *PH 34*, boletín del Instituto Andaluz Patrimonio Histórico pp.: 57-63

**Gobierno de la República de Guatemala**

1945 *Constitución de la República de Guatemala por la asamblea constituyente en 11 de marzo de 1945*.

1985 *Constitución política de Guatemala. Diariol, 3 de junio de 1985*. Guatemala.

**Gražulis, S., Chateigner, D., Downs, R. T., Yokochi, A. F., Qiu, M., Lutterotti, L., Manakova, E., Butkus, J., Moeck, P., Le Bail, A.**

2009 *Crystallography Open Database – an open-access collection of crystal structures*. *Journal of Applied Crystallography*, 42(4), 726-729.

**Grübe, N.**

2000 *Los mayas. Una civilización milenaria*. Könemann, Colonia.

**Hall, C., Hoff, W.D. y Hamilton, A.**

2008 Capillary rise dynamics in masonry structures: The role of water flux in long-term damage. En *Proceedings of the 11th International Congress on Deterioration and conservation of Stone*. Lukaszewicz, W. Y Niemcewicz, P. (Eds.)pp.: 635-642. Torun, Poland. Nicolaus Copernicus University.

**Hammond, N.**

1988 *La civilización maya*. Editorial Istmo, Madrid.

**Hansen, E., Hansen, R. y Derrick, M.**

1995 Los análisis de los estucos y pinturas arquitectónicas de Nakbé: Resultados preliminares de los estudios de los métodos y materiales de reproducción. En *VIII Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala*. Laporte, J.P. y Escobedo, H. (eds.), pp.: 456-470. Museo Nacional de Arqueología y Etnología. Guatemala.

**Hansen, E. F. y C. Castellanos**

2005 Consideraciones para la definición de estrategias para la conservación de relieves y frisos en estuco en la región Maya. En *XVIII Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, 2004* (editado por J.P. Laporte, B. Arroyo y H. Mejía), pp.576-584. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala.

**Herbert, K.**

2009 Ancient Maya architectural graffiti. En *Los grafitos mayas. Cuadernos de arquitectura y arqueología maya II*. Vidal, C. y Muñoz, G. (eds.) pp.14-27. Valencia 2009.

**Herrera Villatoro, L.**

2005 *Caracterización e investigación geológica de los materiales utilizados en la construcción civil en Guatemala*. Trabajo de graduación. Facultad de ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

**Hurst, H., Taube, K., Cifuentes, Y., Bass, A., O'Grady, C., Saturno, W. y Stuart, D.**

2014 Pigmento y pintura: Resumen de los estudios iniciales de la reconstrucción de los fragmentos de la Pintura mural del Sitio arqueológico San Bartolo. En *XXVIII Simposio de investigaciones arqueológicas en Guatemala 2014* (editado por B. Arroyo, L. Méndez Salinas y L. Paiz), pp. 785-796. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala.

**ICMUV 2019 Instituto Universitario de Ciencia de los Materiales, Universitat de València.**

2019 Recuperado de <https://www.uv.es/uvweb/instituto-ciencia-materiales-icmuv/es/icmuv/tecnicas-disponibles/difraccion-rx-1285918028148.html> (29/4/2019).

**Jáidar Benavides, Y.**

2006 *Los extractos vegetales usados como aditivos en los morteros de cal con fines de conservación*. Tesis de licenciatura, Instituto Nacional de Antropología e Historia, México.

**Juárez Cosío, D.**

2009 El proyecto Yaxchilán y las alternativas de conservación en la década de 1970. En *XXII Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, 2008* (editado por J.P. Laporte, B. Arroyo y H. Mejía), pp.296- 306. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala (versión digital).

**Kröner, S. Mas i Barberà, X., Osete, L. & Guash, N.**

2010 *Identificación y caracterización de materiales pétreos en patrimonio histórico-artístico*. Valencia, *Universitat Politècnica de València* (ed.).

**Laporte, J.P**

1996 La cuenca del río Mopan-Belice: Una sub-región cultural de las Tierras Bajas Mayas centrales. En *IX Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, 1995* (editado por J.P. Laporte y H. Escobedo), pp.223-251. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala (versión digital).

1999 Trabajos no divulgado del Proyecto Nacional Tikal, Parte 1: Palacio de los Cinco Pisos, Grupo F, Grupo 6B- II, Plaza de los Siete Templos. En *XII Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, 1998* (editado por J.P. Laporte y H.L. Escobedo), pp.147-156. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala.

**Larios Villalta, R.**

1995 Deterioro y conservación *in situ* de la piedra y los estucos en construcciones arqueológicas del área Maya. En *VIII Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, 1994* (editado por J.P. Laporte y H. Escobedo), pp.451-455. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala.

2003 Criterios de restauración arquitectónica en el área maya. Fundación para el avance de los estudios mesoamericanos (FAMSI), consultado 2/1/2019. [www.famsi.org/reports/99026es/index.html](http://www.famsi.org/reports/99026es/index.html)

**Lewin, S. Z.**

- 1982 The mechanism of masonry decay through crystallization. En *Conservation of Historic Stone Buildings and Monuments: Report of the Committee on Conservation of Historic Stone Buildings and Monuments, National Materials Advisory Board, Commission on Engineering and Technical Systems*. National Research Council, 120-44. Washington DC: National Academy Press.

**Littmann, E.**

- 1958 Ancient Mesoamerican mortars, plasters and stuccos: The composition and origin of *Sascab*. En *American Antiquity* Vol. 24 Nº24, pp.: 172-176.
- 1959 Ancient Mesoamerican Mortars, Plasters, and Stuccos: Palenque, Chiapas. En *American Antiquity* Vol. 25 (2), pp.: 262-266.
- 1960 Ancient Mesoamerican mortars, plasters and stuccos: The use of bark extracts in lime plasters. En *American Antiquity* Vol. 25 Nº4 pp.: 593-597.

**López, T. y Dávila, V. M.**

- 1999 Evaluación de los tratamientos de conservación efectuados en los mascarones de estuco de la zona arqueológica de Kohunlich, Quintana Roo. En *Restaura*. Revista electrónica de conservación, Coordinación Nacional de Conservación del Patrimonio Cultural.

**López-Menchero, V.M.**

- 2010 Manual para la puesta en valor del patrimonio arqueológico al aire libre. Gijón. Editorial Trea.

**Lorenzo, F.**

- 2011 *Los grafitos de La Blanca, Petén, Guatemala. Estudio, registro y reproducción*. (Tesis de master). Universitat Politècnica de Valencia.

**Lorenzo, F. y Carrascosa, B.**

- 2015 Estudio de morteros tradicionales de cal en área maya. Comportamiento de distintos áridos frente a ensayos físico- químicos. En *Arché* Nº 8-9 y 10. pp.: 56-66. Publicación del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio, Valencia.
- 2017 Control *in situ* de la permeabilidad de agua en morteros de cal con aditivos orgánicos, empleados en la reintegración de estucos mayas. En *Arché* Nº 11 y 12, pp.:11-18. Publicación del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio, Valencia.

**MAGA**

- 2001 *Mapa fisiográfico geomorfológico de la República de Guatemala a escala 1:250,00. Memoria técnica*. Unidad de políticas e información estratégica (UPIED-MAGA)-Programa de emergencias por desastres naturales (MAGA-BID).Ministerio de agricultura, ganadería y alimentación, Guatemala.

**Magaloni, D.**

- 1994 *Metodología para el análisis de la técnica pictórica mural prehispánica: el Templo rojo de Cacaxtla, México*. Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- 1995 Técnicas de la pintura mural en Mesoamérica. En *Arqueología mexicana* Nº3(16) pp.:16-23.
- 1998 El arte en el hacer: La técnica pictórica y color en las pinturas de Bonampak. En B. de la Fuente y L. Staines (eds), *La pintura mural prehispánica en México II. Bonampak*. Instituto de Investigaciones Estéticas, Universidad Nacional Autónoma de México, pp.:49-80.
- 2001 Materiales y técnicas de la pintura mural maya. En B. de la Fuente y L. Staines (eds.) *La pintura mural prehispánica en México II. Área maya*. Instituto de Investigaciones Estéticas, Universidad Nacional Autónoma de México, pp.:155-198.

**Magaloni, D., Newman, R., Baños, L. y Falcon, T.**

1996 *Los pintores de Bonampak*. Recuperado de <http://www.mesoweb.com/pari/publications/rt10/Pintores-OCR.pdf> el 9/2017

**Magar, V.**

2013 El uso de la cal en conservación: la experiencia internacional. En *La Cal. Historia, propiedades y usos*. Barba, L. Y Villaseñor, I. (Eds.) pp.:159-182. Universidad Nacional Autónoma de México.

**Mainou, L.M.**

2000 Conchas y caracoles prehispánicos exentos de policromía. En Renata Schneider (Coord.) *Conservación de materiales arqueológicos in situ*. México: INAH pp.:109-116.

**Margalha G., Veiga M<sup>a</sup> R., Santos, A. y De Brito, J.**

2011 Traditional methods of mortar preparation: The hot lime mix method. En *Cement and concrete composites* 33, pp.: 796-804.

2011 The influence of slaking time on lime putty. En *XII International Conference on Durability of Buildings Materials and Components*. Porto, Portugal.

**Mas-Guindal A.J., Martín F., Nuere E. y García de Miguel M.**

1999 *Procedimientos y técnicas constructivas del patrimonio*. Munilla-Lería. Madrid.

**Matarredona, N.**

2015 *La conservación del patrimonio arquitectónico maya. Primeras experiencias (1891-1969)*. Tesis doctoral, *Universitat Politècnica de València*.

**Matteini M. y Moles A.**

2008 *La química en la restauración. Los materiales del arte pictórico*. San Sebastián, España. Ed: Nerea.

**Meehan, P. y Alonso, A.**

2013 Los recubrimientos de protección y sacrificio como alternativa de conservación in situ para monumentos históricos y arqueológicos. En *La Cal. Historia, propiedades y usos*. Barba, L. Y Villaseñor, I. (Eds.) pp: 203-232. Universidad Nacional Autónoma de México.

**Melgosa, M., Pérez, M., Yebra, R., y Huertas, E.**

2001 Algunas reflexiones y recientes recomendaciones internacionales sobre evaluación de diferencias de color. En *Óptica Pura y Aplicada N° 34*, pp.:1-10.

**Méndez, L. E.**

2007 *La necesidad de reglamentación de las actividades derivadas del registro de Bienes Culturales*. Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala.

**Michael, R. y Lawrence, H.**

2006 *A study of carbonation in non-hydraulic lime mortars*. University of Bath, U.K.

**Ministerio de Cultura y Deporte**

2012 Reglamento de investigación arqueológica y disciplinas afines. Guatemala 2-1-2012

**Ministerio de Instrucción pública**

1972 Carta del restauro. Roma, Italia.

**Morales, A.**

1999 Relieve en Estuco de la Estructura XIX, Palenque. Fundación para el avance de los estudios mesoamericanos (FAMSI©) Recurso electrónico consultado 3/1/2019: <http://www.famsi.org/reports/98050/>

**Morris, E., Charlot, J. Y Axtell, A.**

1931 *The temple of the Warriors at Chichen Itzá, Yucatán* Vol. I. Carnegie Institution of Washington.

**Muñoz Cosme, G.**

2005 La arquitectura palaciega de La Blanca. En (Muñoz Cosme, G. y Vidal Lorenzo, C. Eds.) *La Blanca. Arqueología y desarrollo*, pp. 25-33. Universitat Politècnica de València. Valencia.

2006a Estructura urbana y arquitectura en La Blanca, Petén. En *XIX Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, 2005* (editado por J.P. Laporte, B. Arroyo y H. Mejía), pp.340-351. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala (versión digital).

2006b Proporción y arquitectura. En (Muñoz Cosme, G. y Vidal Lorenzo, C. Eds) *La Blanca, arquitectura y clasicismo*, pp.28-36. Valencia.

2006c *Introducción a la arquitectura maya*. Ed. Biblioteca TC. Valencia.

2007 El palacio de Oriente. En (Vidal Lorenzo, C. y Muñoz Cosme, G. Eds) *La Blanca y su entorno. Cuadernos de arquitectura y arqueología maya*, pp. 22-28. Valencia.

**Muñoz, G. y Vidal, C.**

2007 Tipología palaciega de la Acrópolis de La Blanca, Petén. En *XX Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, 2006* (editado por J.P. Laporte, B. Arroyo y H. Mejía), pp. 659-666. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala. (Versión digital).

2014 La Blanca, un asentamiento urbano maya en la cuenca del río Mopán. En *Revista Liminar, estudios sociales y humanísticos volumen XII n°1*, pp.36-52, Mexico.

**Muñoz Cosme, G. Vidal Lorenzo, C. y Peiró Victoria, A.**

2010 La arquitectura de la acrópolis de La Blanca, Guatemala. En *Arché n° 4 y 5*, pp.381-386. Universitat Politècnica de valencia.

**NEURTEK**

(s.f) Abrasímetro lineal Taber© Modelo 5750. Manual de instrucciones. Eibar, España. Recuperado 7/5/2016 de [www.neurtek.com](http://www.neurtek.com)

**Ngoma, A.**

2009 *Characterisation and consolidation of historical lime mortars in Cultural Heritage Buildings and associated structures in East Africa*. Tesis doctoral, University of Dar-es-Salam, Tanzania.

**Orea, H., Buitrago, G. Y González, O.**

2011 Recientes intervenciones en Bonampak. Hacia una nueva lectura de los murales en el Templo de las Pinturas. En *Intervención Año 2 N° 3* pp.: 58-65 Enero-junio 2011.

**Ortiz S., Goguitchaichvili, A. y Morales, J.**

2015 Sobre la edad de los hornos de cal en el área maya. En *Arqueología Iberoamericana* N° 28 pp.: 9-15

**Osca, J.**

2005 El empleo de consolidantes inorgánicos y organosilíceos como alternativa a los consolidantes orgánicos. En *Actas del Seminario sobre restauración de pinturas murales*, pp.: 13-46. Aguilar de Campoo, España.

**Paredes S.**

2005 Sobreviviendo en la selva: las realidades del saqueo en las aldeas rurales de El Petén, Guatemala. FAMSÍ©. Recuperado el 30/1/2017 de <http://www.famsi.org/reports/95096es/95096esParedesMaury01.pdf>

**Pauly, J.P.**

1976 Maladie alveolaire conditions de formation et d'évolution. En *Symposio The conservation of Stone I*. Bologna.

**Pocostales Plaza L.**

2015 *Descripción y evolución de las fases de carbonato cálcico presentes en los enlucidos de cal en pasta pintados al fresco*. Tesis doctoral, Universitat Autònoma de Barcelona.

**Quintana, O. y Wurster, W.**

2001 *Ciudades Mayas del noreste del Petén, Guatemala*. KAVA, Philipp von Zabern, Mainz.

**Quintanilla, C. Y Demarest, A.**

2012 Variantes de la destrucción de las ciudades del valle del río La Pasión: Implicaciones del colapso en el suroeste de Petén. En *XXVI Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala* ( Arroyo, B. y Méndez, L. Eds.), pp. 977-990. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala.

**RILEM**

2006 Water absorption tube test. Rilem II.4. Recuperado 3/4/2017 de [www.amt-labs.com](http://www.amt-labs.com)

**Rodriguez Lara, M.**

2007 La vegetación del sitio arqueológico de La Blanca. Una primera aproximación para el manejo ambiental del sitio. En (Vidal, C. y Muñoz, G. eds.) *La Blanca y su entorno. Cuadernos de arquitectura y arqueología maya*, pp. 122-136. Valencia.

**Rosell i Amigó J.R.**

2013 Aportaciones al conocimiento del comportamiento deformacional de pastas de cal. Tamaño y forma de las partículas y su viscosidad. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya.

**Ruiz de Alarcón, H.**

1999 Tratado de las supersticiones y costumbres gentílicas que hoy viven entre los indios naturales de esta Nueva España. Biblioteca virtual Miguel de Cervantes. Recuperado 20/01/2019 de [www.cervantesvirtual.com](http://www.cervantesvirtual.com)

**Ruiz, M<sup>a</sup> C.**

2009 El Pixoy como material de conservación de pintura mural y relieves policromados en el área maya. En *Estudios de cultura maya* Vol.35 nº0 pp.: 63-90 Universidad Nacional Autónoma de México.

**Russel, B. y Dahlin, B.**

2007 Traditional burnt-lime production at Mayapán, México. En *Journal of field Archaeology*, Vol. 32 pp.: 407-423.

**San Andrés M. & De La Viña, S.**

2009 *Fundamentos de química y física para la conservación y restauración*. Madrid, España. Ed. Síntesis.

**Schávelzon, D.**

1990 *La conservación del Patrimonio Cultural en América latina. Restauración de edificios prehispánicos en Mesoamérica: 1750-1980*. Facultad de arquitectura, diseño y urbanismo. Universidad de Buenos Aires.

**Schreiner, T.**

2001 Fabricación de cal en Mesoamérica: implicaciones para los mayas del preclásico en Nakbé, Petén. En *XIV Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala* Laporte, J.P., Suasnívar, A.C. y Arroyo, B. (eds.), pp.: 356-368. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala.

2002 *Traditional Maya lime production: Environmental and cultural implications of native American technology*. Tesis doctoral. University of California, Berkeley.

2003 Aspectos rituales de la producción de cal en Mesoamérica. Evidencias y perspectivas de las Tierras Bajas mayas. En *XVI Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala 2002*. Laporte, J.P., Arroyo, B., Escobedo, H. y Mejía, H. (Eds.) pp: 480-487. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala.

Smith, B.J., P.A. Warke, J.P. McGreevy, and H.L. Kane.

2005 Salt-Weathering simulations under hot desert conditions: Agents of enlightenment or perpetrators of preconceptions? En *Geomorphology* 67 (1-2): 211-27.

**Straulino, L.**

2010 a *Fluoruro de sodio. ¿Una alternativa para la conservación de piedra caliza disgregada a través de la remineralización? El caso de la cornisa del edificio 5N2 del Grupo A en Río Bec, Campeche.* Tesis de licenciatura inédita. Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía "Manuel del Castillo Negrete", México D.F

2010 b El fluoruro de sodio. Una alternativa para la consolidación de roca caliza disgregada. En *Intervención Año 1. N.º. 2* pp.: 24-33. Julio-diciembre 2010

2012 El intemperismo de calizas en monumentos prehispánicos mayas. El caso de la cornisa del edificio 5N2, Río Bec. En *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Volumen 64, núm. 1 (pp. 49-60). Mexico.

2015 *Hacer mezclas de cal en Dzibanché durante el Clásico Temprano: La temporalidad y la función arquitectónica como determinantes.* Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.

**Torraca, G.**

1998 Imateriali e il restauro. Il ritorno della calce. En *Le dimore Storiche* 14 pp: 9-10.

2009 *Lectures on materials science for architectural conservation.* EE.UU. The Getty Conservation Institute.

**UNESCO**

1931 Carta de Atenas para la restauración de monumentos históricos. Recuperado 12/2018 de <http://www.icomoscr.org/doc/teoria/VARIOS.1931.carta.atenas.restauracion.monumentos.historicos.pdf>

1947 Ley sobre protección y conservación de los monumentos, objetos arqueológicos históricos y típicos. Recuperado 12/2018 de [http://www.unesco.org/culture/natlaws/media/pdf/guatemala/gt\\_agrmtcreationzonmontsarcheo1970\\_spaorof.pdf](http://www.unesco.org/culture/natlaws/media/pdf/guatemala/gt_agrmtcreationzonmontsarcheo1970_spaorof.pdf)

1964 Carta Internacional sobre la Conservación y Restauración de monumentos y sitios. Recuperado 12/2018 en [https://www.icomos.org/charters/venice\\_sp.pdf](https://www.icomos.org/charters/venice_sp.pdf)

1967 Normas de Quito. Recuperado 12/2019 en <https://www.icomos.org/charters/quito.htm>

1970 Acuerdo de creación de zonas y monumentos arqueológicos, históricos y artísticos de los periodos prehispánico e hispánico. Recuperado 12/2018 de <https://www.wipo.int/edocs/lexdocs/laws/es/gt/gt036es.pdf>

1990 Carta Internacional para la gestión del Patrimonio Arqueológico. Recuperado 12/2018 en [https://www.icomos.org/images/DOCUMENTS/Charters/arch\\_sp.pdf](https://www.icomos.org/images/DOCUMENTS/Charters/arch_sp.pdf)

1994 Documento de Nara sobre la autenticidad. Recuperado 12/2018 de <http://www.planmaestro.ohc.cu/recursos/papel/cartas/1994-nara.pdf>

1999 Carta Internacional para sitios de Significación Cultural. Recuperado 12/2018 de [https://www.icomos.org/charters/tourism\\_sp.pdf](https://www.icomos.org/charters/tourism_sp.pdf)

2000 Carta de la Tierra. Recuperado 20/01/2019 de [http://www.earthcharter.org/invent/images/uploads/echarter\\_spanish.pdf](http://www.earthcharter.org/invent/images/uploads/echarter_spanish.pdf)

2008 Carta para la presentación e interpretación de sitios de Patrimonio Cultural. Recuperado 12/2018 de [https://www.icomos.org/charters/tourism\\_sp.pdf](https://www.icomos.org/charters/tourism_sp.pdf)

Valgañón V.

2008 *Biología aplicada a la conservación y restauración*. Síntesis. Madrid.

Valverde, M<sup>a</sup> C.

2004 Arquitectura. En *Revista Digital Universitaria* Vol. 5 N<sup>o</sup>7, pp.: 1-18, Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado 3/2017 de <http://www.revista.unam.mx/vol.5/num7/art47/art47.html>

Vázquez, A.,

2015 *Conservación de pintura mural y elementos modelados en estuco del Sitio Arqueológico Mayapán*. Trabajo fin de estudios. Escuela de Conservación y Restauración de Bienes Culturales de Galicia.

Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup> L.

2004 Las bases de preparación de la pintura mural maya. El papel de las recetas técnicas en el marco de la conservación y de la creencia. En *Actas del XV congreso de Conservación y Restauración de Bienes Culturales*, pp: 481-492. Murcia.

2006 *Recursos materiales y técnicas pictóricas en los murales de las Tierras Bajas Mayas*. Tesis doctoral. Universidad de Valencia, Valencia.

2007 Los colores y las técnicas de la pintura mural maya. En *Anales del Museo de América*, 15 pp.: 55-66, España.

2010 *La pintura mural maya. Materiales y técnicas*, México: Universidad Nacional Autónoma de México..

Vázquez de Ágredos, M<sup>a</sup> L. y Horcajada, P.

2017 La doble piel de la arquitectura maya: El estuco y el color. Su análisis y conservación. En *Ra monográfico* pp.: 84-97

Vidal, C.

2006 Investigaciones arqueológicas en La Blanca, Petén: Temporada 2004. En *XIX Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, 2005* (editado por J.P. Laporte, B. Arroyo y H. Mejía), pp.790-802. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala (versión digital).

Vidal, C., Valdés, J.A. y Muñoz, C.

2007 El Clásico Terminal y el abandono de los palacios de La Blanca, Petén. En *XX Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala, 2006* (editado por J.P. Laporte, B. Arroyo y H. Mejía), pp. 561-576. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala. (Versión digital).

Vidal, C., Muñoz, G. y Valdés, J.A.

2011 Un Resultados de las investigaciones realizadas en la temporada de campo 2009 en La Blanca (Petén). En *XXIV Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala* (editado por B. Arroyo, L. Paiz, A. Linares y A. Arroyave), pp. 203-225. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala (versión digital).

Vidal, C., Muñoz, G., Horcajada, P. y May, M.

2012 Resultados de las investigaciones realizadas en la temporada de campo 2010 en La Blanca y El Chilonche (Petén). En *XXV Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala* (editado por B. Arroyo, L. Paiz, y H. Mejía), pp. 207-216. Ministerio de Cultura y Deportes, Instituto de Antropología e Historia y Asociación Tikal, Guatemala (versión digital).

Vidal Lorenzo, C y Muñoz Cosme, G. (Dir.)

2008 Informe de las investigaciones arqueológicas del Proyecto La Blanca, Petén, Guatemala. Temporada Octubre-Diciembre 2007.



- 2009 Informe de las investigaciones arqueológicas del Proyecto La Blanca, Petén, Guatemala. Temporada Octubre-Diciembre 2008.
- 2010 Informe de las investigaciones arqueológicas del Proyecto La Blanca, Petén, Guatemala. Temporada Octubre-Diciembre 2009.
- 2011 Informe de las investigaciones arqueológicas del Proyecto La Blanca, Petén, Guatemala. Temporada Octubre-Diciembre 2010.

**Vidal Lorenzo, C y Muñoz Cosme, G.**

- 2013 La crisis de La Blanca en el clásico terminal. En *Millenary mayas societies: Past crises and resilience* (edited by M. Charlotte Arnaud and Alain Breton) pp.: 92-105. Recuperado el 3/2017 de [www.mesoweb.com/publications/MMS/7\\_Vidal-Muñoz](http://www.mesoweb.com/publications/MMS/7_Vidal-Muñoz)

**Vidal, C. y Muñoz, G.(Eds.)**

- 2014 *Artistic Expressions in Maya Architecture: Analysis and Documentation Techniques*. BAR International series 2693.Oxford.

**Videla H.A., Guiamet P. & Gómez de Saravia S.**

- 2003 Biodeterioro de materiales estructurales de sitios arqueológicos de la civilización mayas. En *Revista Museo La Plata*. Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata, Ar-entina.

**Villaseñor, I.**

- 2009a Una de cal por las que van de arena: Un estudio diacrónico de los estucos de Calakmul y Palenque. En *Estudios de la Cultura Maya* Nº33, pp.: 27-49.
- 2009b *Lowland Maya lime plaster technology: A diachronic approach*. Tesis doctoral. Institute of Archaeology, University College London.
- 2010 *Building materials of the ancient Maya a study of archaeological plasters*. Lambert Academic Publishing, Germany.

**Villaseñor, I. y Graham, E.**

- 2010 The use of volcanic materials for the manufacture or pozzolanic plasters in the Maya Lowlands: a preliminary report. En *Journal of archaeological Science* Nº37, pp.: 1339-1347.

**Villaseñor, I. y Barba Pingarrón, L.**

- 2011 El estudio de materiales constructivos en la arqueología mesoamericana. En *Anales de Antropología* 45, pp: 79-98, Universidad Nacional Autónoma de México.
- 2012 Los orígenes tecnológicos de la cal. En *Cuicuilco* Vol. 19 Nº55, pp.: 11-41

**Vitruvio**

- 2000 *Los diez libros de arquitectura*. Madrid. Alianza editorial.

**Whistler Roy L. y BeMiller James N.**

- 1959 *Industrial gums. Polysaccharides and their derivatives*. New York . Academic Press.



# ANEXO 1

## INFORME ANALÍTICO

# INFORME ANALÍTICO

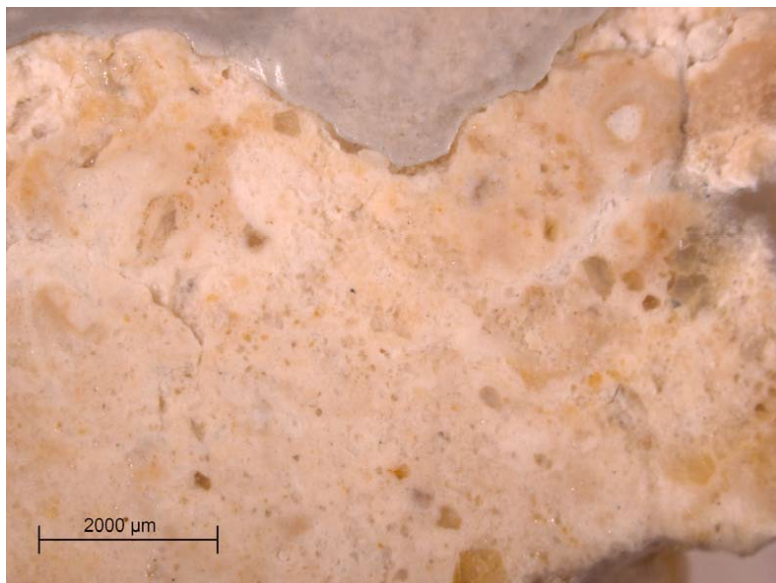
Informe realizado por:

Dra. Laura Osete Cortina

Dr. Stephan Kröner

Dra. María Teresa Doménech Carbó

Valencia, 14 de Junio de 2010



**Microfotografías de la muestra 6J2-4-7 en sección transversal, luz incidente**

## Espectro 1

### MATERIAL PÉTRCO

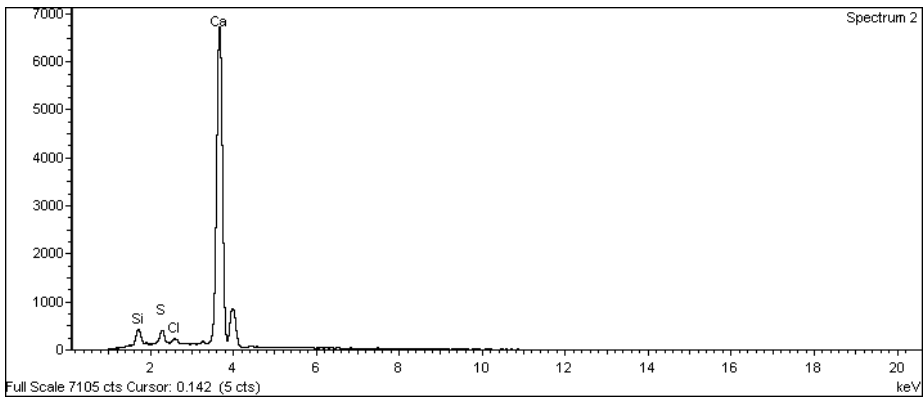
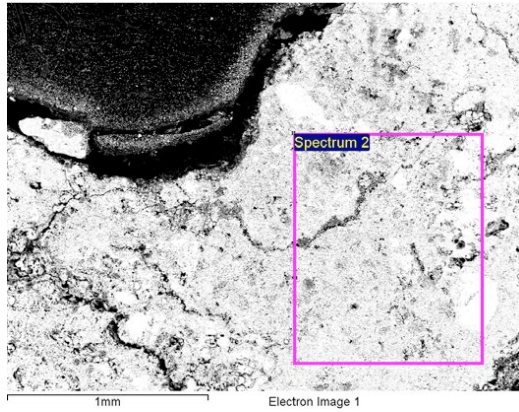
Site of Interest 2, COMP 50X

### Muestra 6J2-4-7

ID: 10-07-6J2-4-7

**Interpretación de resultados:** Análisis de área. Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), minerales silíceos y sales (sulfatos y cloruros).

Element	Weight%	Atomic%
Si K	3.41	4.75
S K	2.73	3.34
Cl K	1.25	1.38
Ca K	92.61	90.52
Totals	100.00	



## Distribución puntual de elementos 2

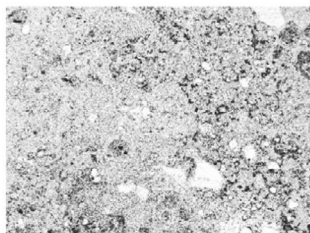
### MATERIAL PÉTREO

Site of Interest 4, INTERIOR, SE 1500

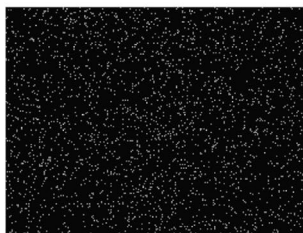
### Muestra 6J2-4-7

ID: 10-07-6J2-4-7

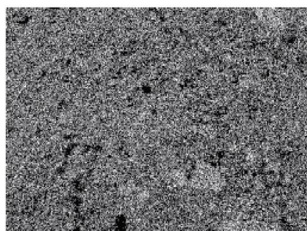
**Interpretación de resultados:** La distribución puntual de elementos obtenida para una zona del interior del fragmento de material pétreo pone de relieve la presencia abundante de calcio asociada a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ). En menor proporción también se detecta la acumulación de otros elementos como el azufre (S) y cloro (Cl), indicativos de la presencia de compuestos salinos (sulfatos y cloruros), y silicio y aluminio (Si y Al) relativos a la presencia de minerales silíceos accesorios.



Electron Image 1



Fe Ka1



Ca Ka1



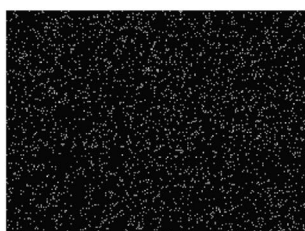
S Ka1



Cl Ka1



Si Ka1



Al Ka1

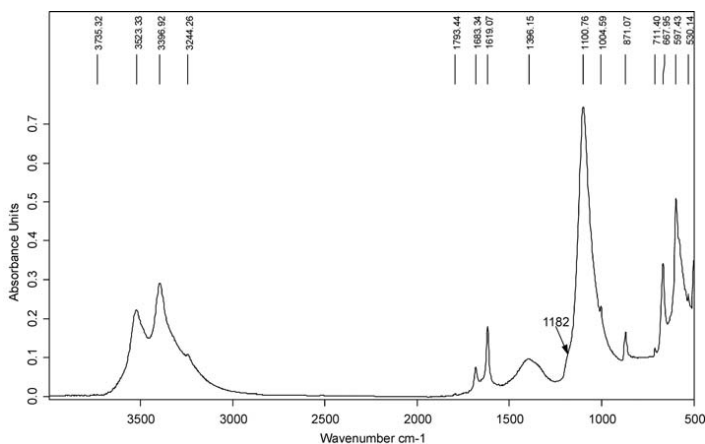


Mg Ka1\_2

### 3.3 Estudio químico-mineralógico mediante Espectroscopía Infrarroja (FT-IR)

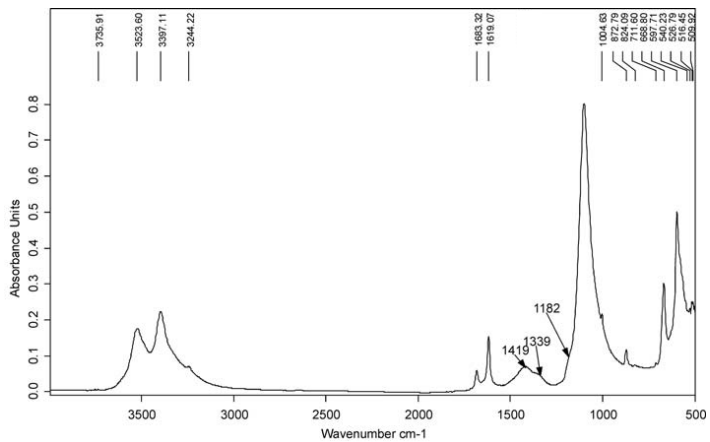
Con el propósito de corroborar los resultados obtenidos previamente mediante SEM/EDX y de determinar la naturaleza de los depósitos blanquecinos superficiales, la muestra de material pétreo objeto de estudio y las muestras de depósitos blanquecinos fueron analizadas mediante Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FT-IR).

En todos los espectros infrarrojos obtenidos para las muestras de depósitos blanquecinos superficiales se identifica como componente mayoritario el yeso. También se detecta en mucha menor proporción la presencia de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) que puede asociarse tanto a depósitos superficiales como a partículas del soporte pétreo que han sido extraídas en la toma de muestra y silicatos relativos a minerales silíceos accesorios (arcillas). Mencionar que en tres de las muestras analizadas también se han identificado nitratos y en la superficie del material pétreo (muestra 6J2-4-7) se detecta materia orgánica de naturaleza lipídica en pequeña proporción.

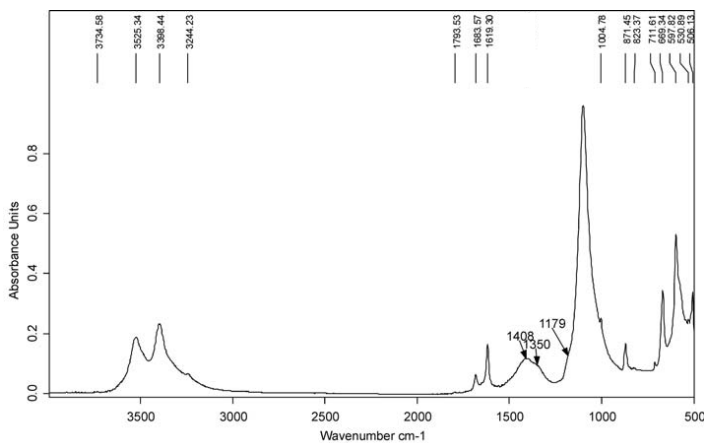


**Espectro infrarrojo de la muestra 6J1-3-10**

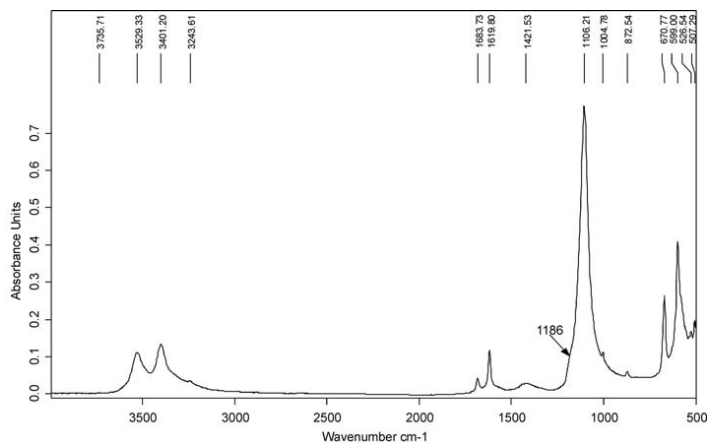




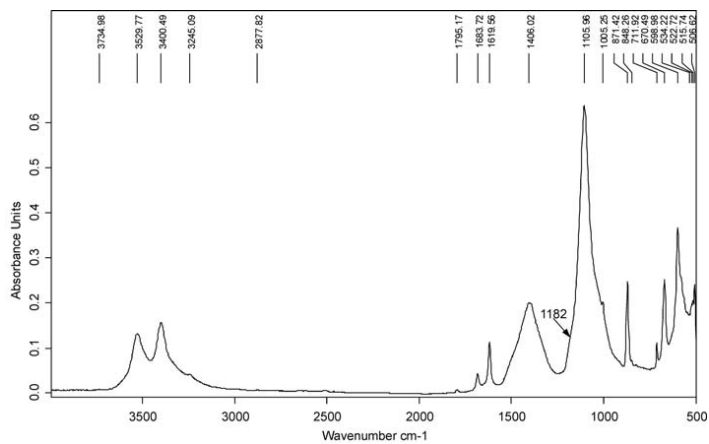
**Espectro infrarrojo de la muestra 6J2-1-3**



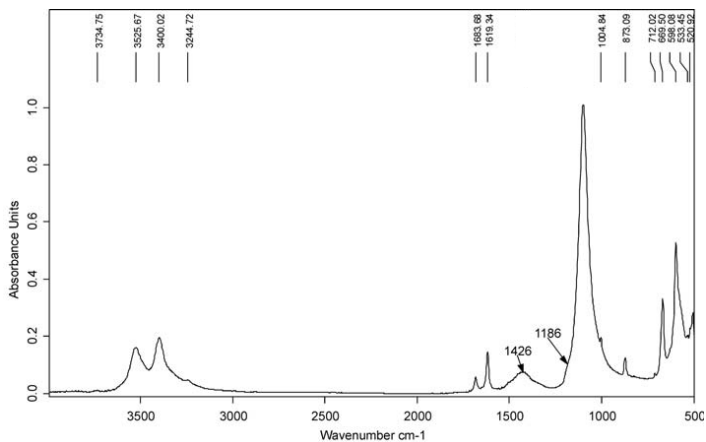
**Espectro infrarrojo de la muestra 6J2-1-4**



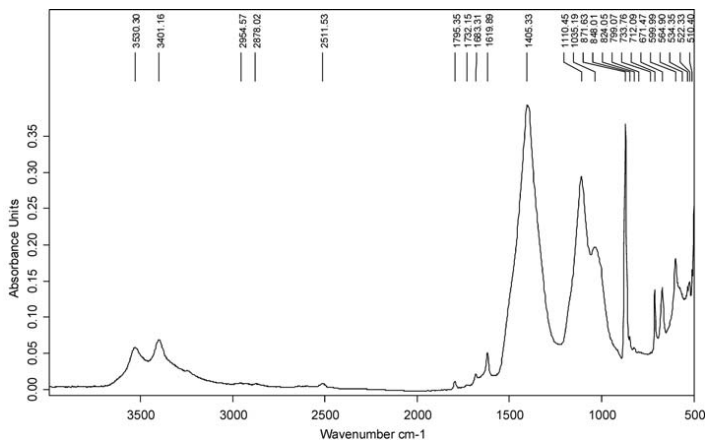
**Espectro infrarrojo de la muestra 6J2-2-5**



**Espectro infrarrojo de la muestra 6J2-4-1**



**Espectro infrarrojo de la muestra 6J2-4-2**



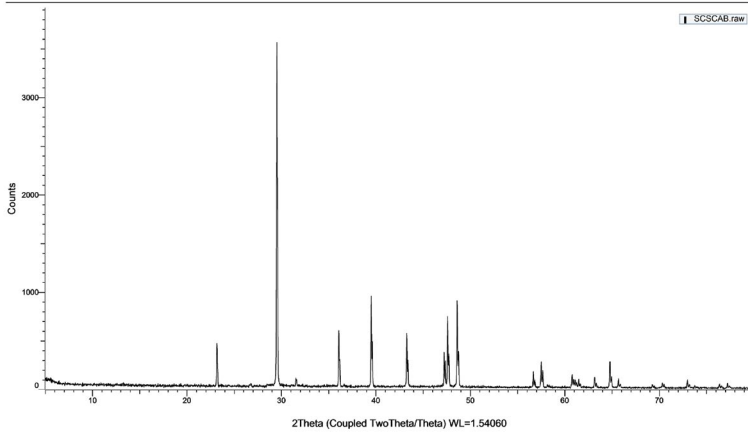
**Espectro infrarrojo de la muestra 6J2-4-7**



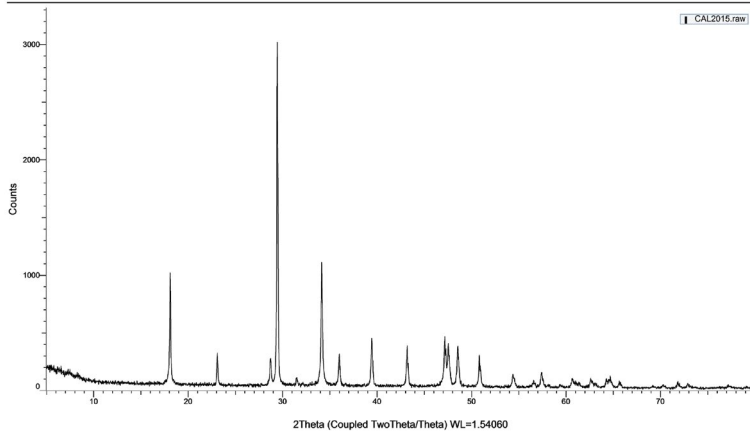
# ANEXO 2

## DIFRACTOGRAMAS OBTENIDOS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

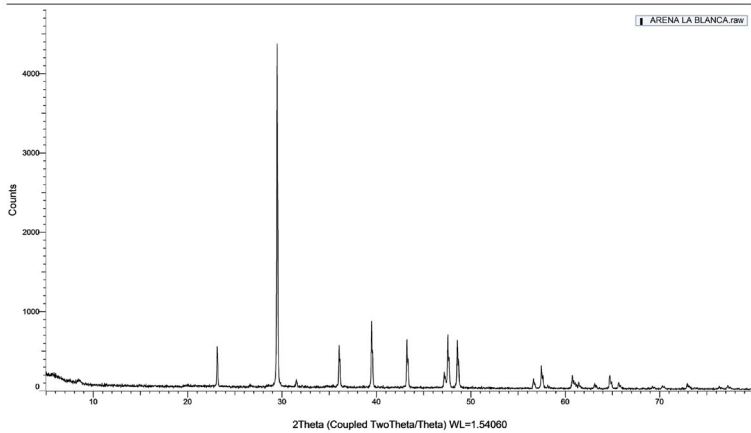
SCSCAB (Coupled TwoTheta/Theta)



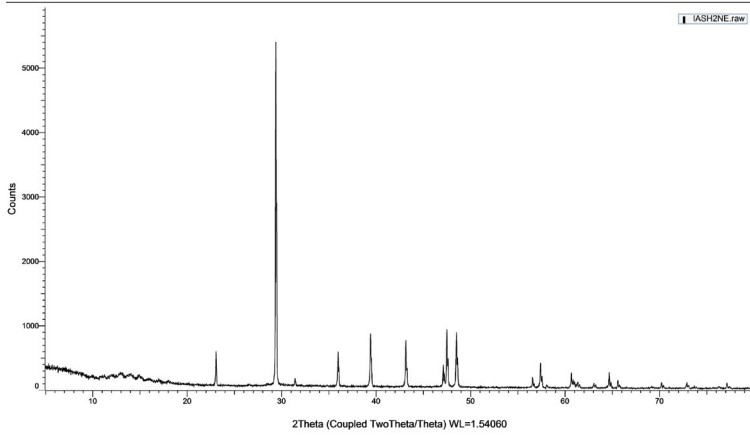
CAL2015 (Coupled TwoTheta/Theta)



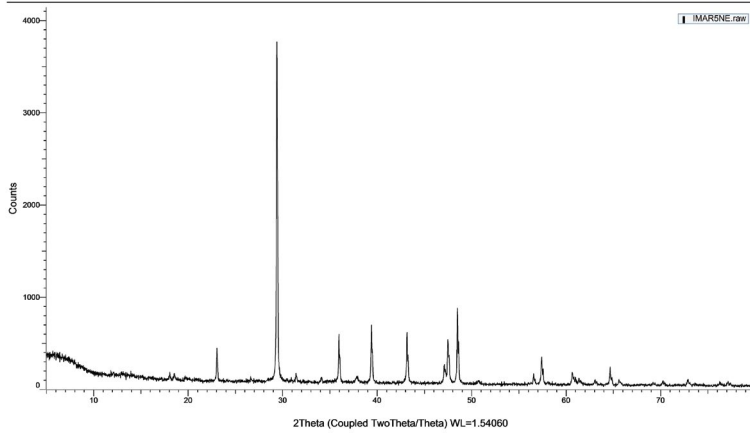
ARENA LA BLANCA (Coupled TwoTheta/Theta)



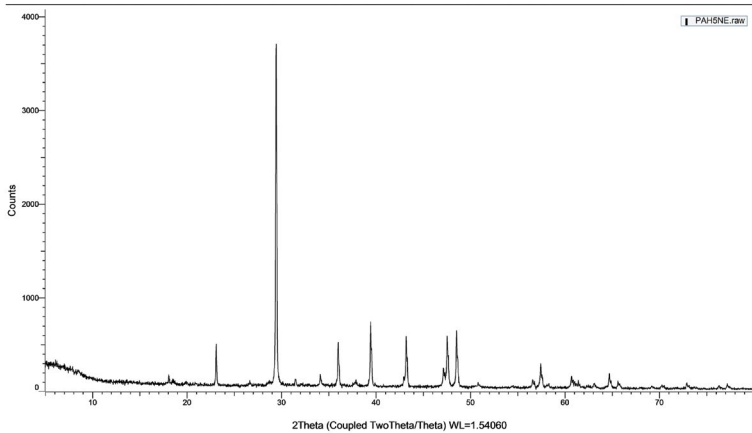
IASH2NE (Coupled TwoTheta/Theta)



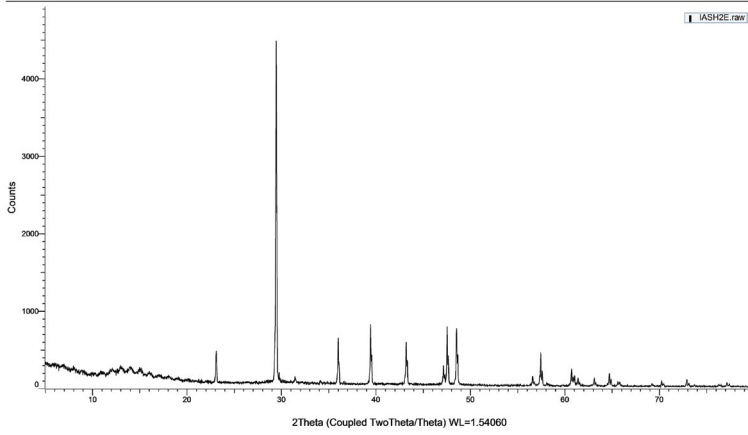
IMAR5NE (Coupled TwoTheta/Theta)



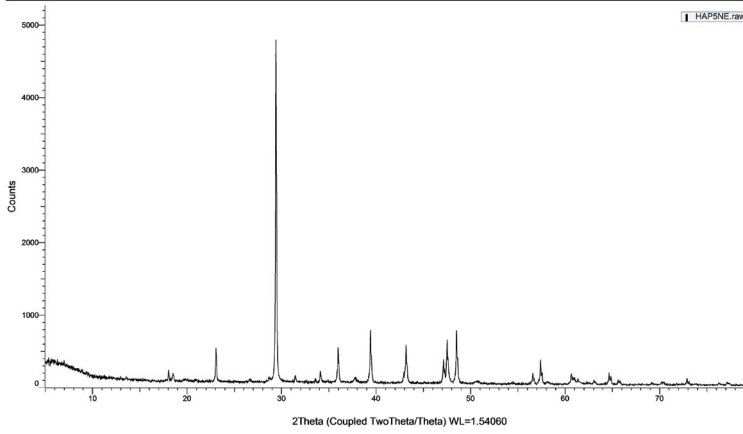
PAH5NE (Coupled TwoTheta/Theta)



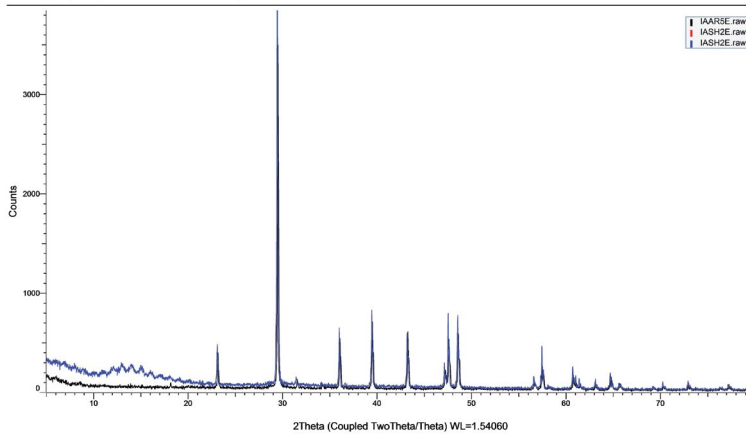
IASH2E (Coupled TwoTheta/Theta)



HAP5NE (Coupled TwoTheta/Theta)

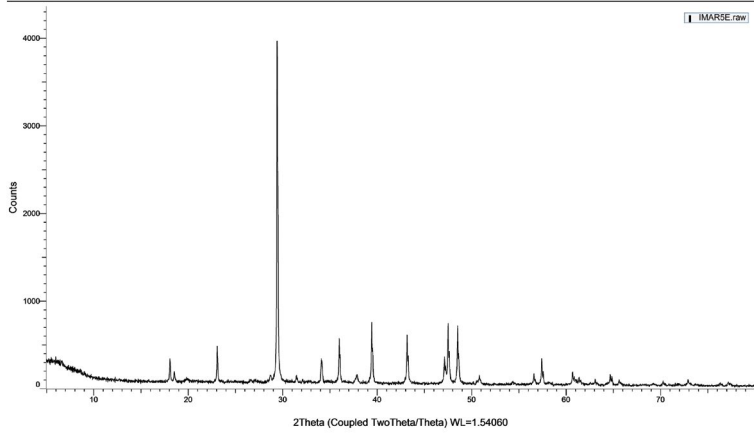


IAAR5E (Coupled TwoTheta/Theta)

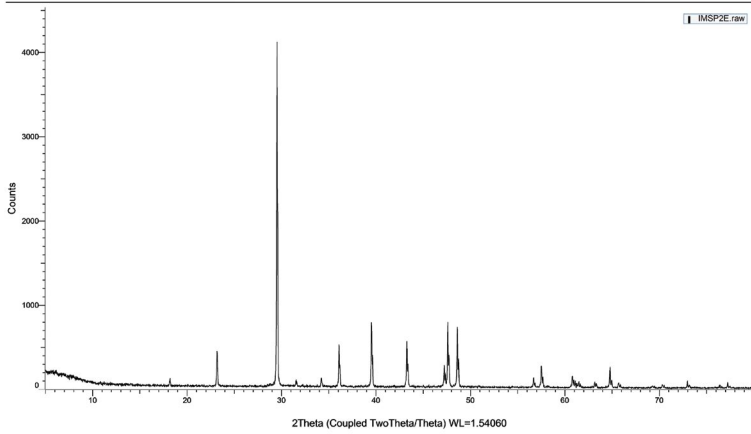




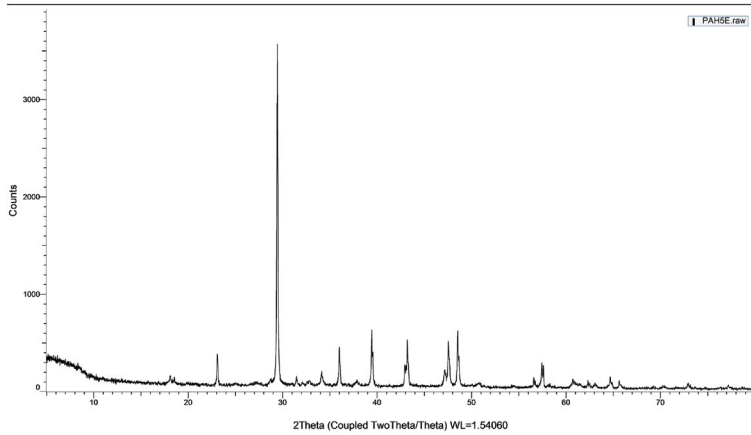
IMAR5E (Coupled TwoTheta/Theta)



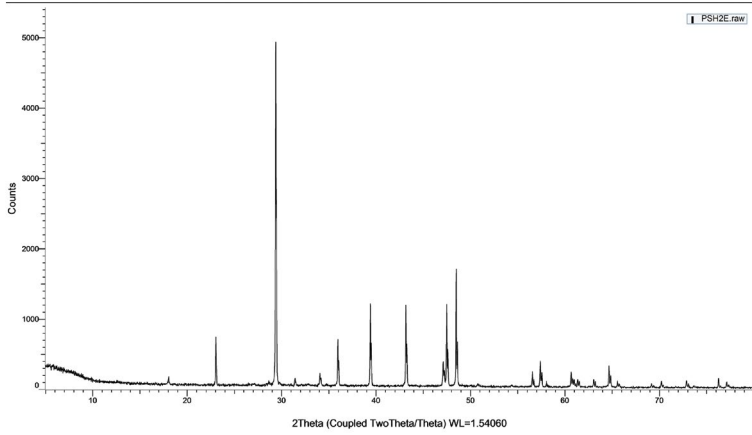
IMSP2E (Coupled TwoTheta/Theta)



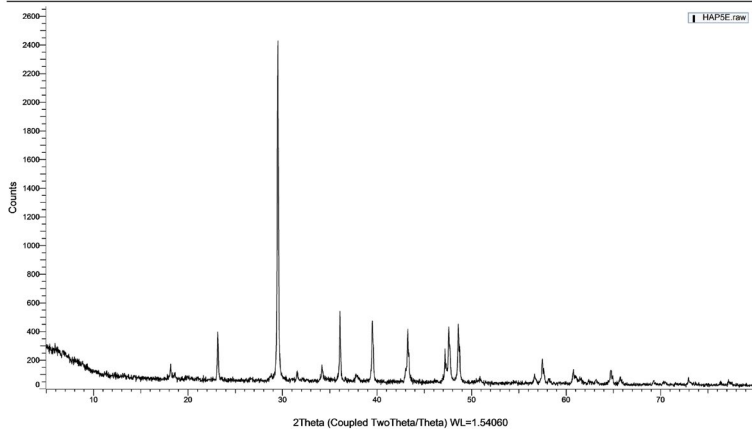
PAH5E (Coupled TwoTheta/Theta)



PSH2E (Coupled TwoTheta/Theta)



HAP5E (Coupled TwoTheta/Theta)



HSR2E (Coupled TwoTheta/Theta)

