

**HUMAN FACTORS &  
TECHNOLOGICAL DESIGN INNOVATION**  
**3**

ATTI DEL SEMINARIO INTERNAZIONALE

# **LE MURA URBANE CROLLANO**

**CONSERVAZIONE E MANUTENZIONE PROGRAMMATA  
DELLA CINTA MURARIA DEI CENTRI STORICI**

A CURA DI  
MICHELE DI SIVO, DANIELA LADIANA

CON I CONTRIBUTI DI

CANIVELL JACINTO, CASINI LEONARDO, CID PATRICIA, CINELLI FABRIZIO, DE FALCO ANNA,  
DI SIVO MICHELE, GÓMEZ SEBASTIÁN, GRACIANI GARCÍA AMPARO, JARAMILLO CARLOS,  
JARAMILLO-MORILLA ANTONIO, KARWACKA CODINI EWA, LADIANA DANIELA, LANDI STEFANIA,  
LEÓN SANTIAGO, LINERO BARONI MIRTA, MASCORT-ALBEA JOSÉ EMILIO, PAGLIARA STEFANO,  
PALERMO MICHELE, ROMERO-HERNÁNDEZ ROCÍO, SCALICI MARIA

**P | S | A**  
UNIVERSITY  
PRESS

Le mura urbane crollano : conservazione e manutenzione programmata della cinta muraria dei centri storici : atti del seminario internazionale, Pisa, 29 giugno 2018 / Michele Di Sivo, Daniela Ladiana ... [et al.] . - Pisa : Pisa university press, 2019. - (Human factors & technological design innovation ; 3)

725.960288 (WD)

I. Di Sivo, Michele <1951- > II. Ladiana, Daniela 1. Mura – Manutenzione 2. Mura – Conservazione

CIP a cura del Sistema bibliotecario dell'Università di Pisa



Peer reviewed work  
in compliance with  
UPI protocol

Responsabile scientifico

Michele Di Sivo

Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni

Università di Pisa

La pubblicazione degli atti è stata possibile grazie al contributo della Regione Toscana e del Dipartimento D.E.S.T.eC

*In copertina: dall'alto: foto 1 e 2: La cinta muraria di Pisa (Autore Daniela Ladiana); foto 3: Il Torrione di Magliano in Toscana (Autore Anna De Falco); foto 4: Batería de San Jerónimo, Portobelo (Autore Patricia Cid e Leonardo Casini).*

© Copyright 2019 by Pisa University Press srl

Società con socio unico Università di Pisa

Capitale Sociale € 20.000,00 i.v. - Partita IVA 02047370503

Sede legale: Lungarno Pacinotti 43/44 - 56126 Pisa

Tel. + 39 050 2212056 - Fax + 39 050 2212945

press@unipi.it

www.pisauniversitypress.it

ISBN 978-88-3339-175-5

layout grafico: 360grafica.it

impaginazione: Ellissi

L'Editore resta a disposizione degli aventi diritto con i quali non è stato possibile comunicare, per le eventuali omissioni o richieste di soggetti o enti che possano vantare dimostrati diritti sulle immagini riprodotte.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633.

Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate a seguito di specifica autorizzazione rilasciata da CLEARedi - Centro Licenze e Autorizzazione per le Riproduzioni Editoriali - Corso di Porta Romana, 108 - 20122 Milano - Tel. (+39) 02 89280804 - E-mail: info@clearedi.org - Sito web: www.clearedi.org

**COMITATO SCIENTIFICO**

**Marco Giorgio Bevilacqua**

Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni  
Università di Pisa

**Cristiana Cellucci**

Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni  
Università di Pisa

**Bruno Daniotti**

Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito  
Politecnico di Milano

**Marco D'Orazio**

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura  
Università Politecnica delle Marche

**Kazmer Kovacs**

Sapientia Hungarian University  
Transylvania

**Amparo Graciani García**

Universidad de Sevilla

**Daniela Ladiana**

Dipartimento di Architettura  
Università di Chieti-Pescara

**Stefania Landi**

Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni  
Università di Pisa

**Horia Radu Maldovan**

Universitatea de Arhitectură și Urbanism  
"Ion Mincu"  
Bucuresti

**Antonello Sanna**

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura  
Università di Cagliari

**Giovanni Santi**

Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni  
Università di Pisa

**Luisa Santini**

Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni  
Università di Pisa

**COMITATO EDITORIALE**

Marco Occhipinti  
Lediana Rjolti

**EDITING: Daniela Ladiana**

# SOMMARIO

<b>PREFAZIONE</b>	9
<i>Marco Giorgio Bevilacqua</i>	
<b>INTRODUZIONE</b>	
Le mura urbane crollano	13
<i>Michele Di Sivo, Daniela Ladiana</i>	
<b>I</b>	
<b>CONOSCENZA</b>	17
1. Pisa e Ripafratta. Alcune riflessioni sulla metodologia della ricerca storica, sui valori e le potenzialità del sistema difensivo urbano e extraurbano	
<i>Ewa Karwacka Codini</i>	19
2. Metodologia di analisi e di intervento per la conservazione dei centri fortificati della Bassa Sabina	
<i>Stefania Landi</i>	41
3. Unas notas para la caracterización y la evaluación de las murallas de tierra compactada (tapial) en el Sur de la Península Ibérica	
<i>Amparo Graciani García, Jacinto Canivell</i>	57

<b>II</b>		
<b>FATTORI DI RISCHIO</b>		71
4. Valutazione dello stato di sicurezza delle mura urbane		
<i>Anna De Falco</i>		73
5. Control of biodeterioration in urban walls		
<i>Fabrizio Cinelli</i>		87
6. Problemi idraulici connessi a crolli di mura urbane		
<i>Stefano Pagliara, Michele Palermo</i>		107
<b>III</b>		
<b>DIAGNOSTICA</b>		117
7. Metodología de evaluación y monitorización del patrimonio basado en la gestión cartográfica digital. La Muralla de Sevilla		
<i>Jacinto Canivell, Antonio Jaramillo-Morilla, José Emilio Mascort-Albea, Rocío Romero-Hernández</i>		119
8. Le tecnologie <i>no-dig</i> per la ricerca, la mappatura e la diagnostica delle reti		
<i>Daniela Ladiana, Michele Di Sivo</i>		137
<b>IV</b>		
<b>MANUTENZIONE E CONSERVAZIONE</b>		155
9. La conservazione programmata del patrimonio storico-architettonico. Tecnologia di processo basata sulla conoscenza e l'informazione		
<i>Michele Di Sivo</i>		157
10. Strategie e strumenti delle tecnologie di manutenzione per la conservazione programmata del patrimonio storico-architettonico		
<i>Daniela Ladiana</i>		175

11. Conservación del legado técnico cultural del Real Cuerpo de Ingenieros en Panamá: el patrimonio fortificado de Portobelo y San Lorenzo <i>Patricia Cid, Leonardo Casini, Santiago León, Sebastián Gómez, Carlos Jaramillo, Mirta Linero Baroni, Maria Scalici</i>	193
Elenco degli autori	215

## PREFAZIONE

MARCO GIORGIO BEVILACQUA

I recenti crolli delle mura urbane in diversi centri storici della Toscana hanno evidenziato la fragilità diffusa dei sistemi di difesa storici, fragilità che appare imporsi nella più ampia questione della vulnerabilità del paesaggio storico.

Il fenomeno, spesso imputato ad eventi meteorici straordinari, evidenzia tuttavia una maggiore complessità e richiede con urgenza che maggiori risorse siano destinate alla conservazione del patrimonio storico.

La conferenza internazionale “Le mura urbane crollano. Conservazione e manutenzione programmata della cinta muraria dei centri storici”, organizzata da Michele Di Sivo presso la Scuola di Ingegneria dell’Università di Pisa e promossa dal Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile Architettura, ha inteso proporre una riflessione sul tema.

Al centro del dibattito, la persistente assenza di una cultura di programmazione degli interventi manutentivi nelle politiche di tutela del patrimonio storico-architettonico. Diversi gli interventi in programma, che – seguendo una linea metodologica – affrontano il problema in chiave interdisciplinare. Conoscenza, studio dei fattori di rischio, diagnostica, strumenti tecnici per la conservazione e manutenzione programmata: questi i *main topics* della conferenza.

La sessione dedicata alla Conoscenza ha previsto diversi interventi su alcuni casi studio nazionali e internazionali. Appare evidente come un approfondito studio storico-conoscitivo sia fondamentale per pianificare qualsiasi azione; oltre alla comprensione delle varie fasi costruttive, che contempla quindi le diverse tecniche di intervento messe in atto nel tempo per modificare, risarcire, aggiornare i sistemi di difesa, lo studio non deve tralasciare i più recenti interventi di restauro o consolidamento, a volte tra le principali cause di degrado.

I fattori di rischio comprendono tutti gli aspetti di interazione delle strutture murarie con l'ambiente: lo smaltimento delle acque, le cause e i meccanismi di alterazione naturale e antropica, lo stato di sicurezza delle strutture, gli attacchi biologici.

Alle nuove tecnologie di indagine non invasiva e ad alcune esperienze virtuose nel contesto nazionale e internazionale è dedicata la sessione sulla diagnostica, che riguarda sia le strutture murarie, sia il sottosuolo urbano. A questo proposito, la mappatura delle reti dei sottoservizi urbani appare centrale nella conservazione delle strutture murarie, essendo il loro malfunzionamento o deterioramento tra le più frequenti cause di dissesto.

A conclusione della giornata, si ribadisce l'importanza della conservazione e della manutenzione programmata per la tutela del patrimonio storico, con analisi delle criticità, delle strategie e degli strumenti per la sua messa in atto.

La conferenza, quindi, ha inteso offrire un importante contributo per la diffusione a livello nazionale dei principi e metodi della manutenzione programmata, strumento imprescindibile per prevenire eventi disastrosi e garantire la conservazione del patrimonio storico-architettonico.

Nell'attesa che si consolidi fattivamente questa pratica nelle politiche di conservazione e tutela del patrimonio storico, anche con lo stanziamento di adeguati finanziamenti, è sulla formazione delle nuove generazioni di architetti e ingegneri che bisogna intervenire; ed è per questo che il Corso di Laurea, che in questa sede rappresento, ha



PREFAZIONE

voluto promuovere la conferenza e recepire l'invito a dare adeguato spazio ai principi della conservazione e manutenzione programmata all'interno delle sua offerta formativa rinnovata.

*Marco Giorgio Bevilacqua  
Presidente del CdLM Ingegneria Edile Architettura  
Università di Pisa*

## INTRODUZIONE

### LE MURA URBANE CROLLANO

Il testo raccoglie gli atti del seminario internazionale organizzato per affrontare le complesse problematiche inerenti ai crolli delle cinte murarie. Nella Regione Toscana, a Pietrasanta, Volterra, Poggio a Caiano, San Gimignano grandi masse di terra sono franate trascinando con sé grossi tratti di strutture murarie poiché non è stata garantita da tempo l'opera antica e abituale della manutenzione.

Tali crolli vengono così a rappresentare la punta di un iceberg della condizione di vulnerabilità di un enorme e diffuso patrimonio edilizio storico sempre più esposto a fattori di rischio che impone la necessità di attivare una doverosa e improcrastinabile politica di conservazione e manutenzione programmata dei beni.

Cosa e come fare, nel breve e lungo periodo, sono i temi fondamentali dell'incontro su *“Le mura urbane crollano. Conservazione e Manutenzione programmata della cinta muraria dei centri storici”* per riflettere su aspetti metodologici, quali: la conoscenza, i fattori di rischio, la diagnostica e gli strumenti tecnici per la conservazione e la manutenzione programmata.

Per la tutela e la conservazione delle mura urbane, si è inteso restituire il sistema di conoscenze – evidentemente di carattere multidisciplinare – utile ad attivare processi orientati a impedire, oppure rallentare, l'avanzare del degrado e a prevenire i rischi insiti nell'insieme delle relazioni che connettono i manufatti al loro contesto.

I contributi raccolti sono focalizzati sui contenuti fondamentali per la costruzione del processo di conservazione programmata di un sistema complesso come le mura urbane: un tema di ricerca che il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni dell'Università di Pisa ha intrapreso per lo sviluppo di metodologie e strumentazioni concettuali e operative per la conservazione di questi monumenti così importanti per l'identità delle comunità insediate e per la storia e la caratterizzazione del paesaggio urbano.

L'attività di studio e sperimentazione è stata avviata anche nella logica della progressiva implementazione, presso il Dipartimento, di un Laboratorio multidisciplinare sulla conservazione programmata capace di erogare un servizio, in ambito regionale e nazionale, per la conservazione dei monumenti. Si fa qui riferimento all'iniziativa dell'attivazione di un servizio impostato dal punto di vista delle esperienze più avanzate, sviluppate a livello europeo, sul *MonumentenWacht* (che tradotto letteralmente significa "Sentinelle dei monumenti"). Queste hanno, difatti, condotto a importanti risultati, frutto dell'applicazione dei principi della conservazione programmata del patrimonio storico-architettonico, attraverso la previsione ed erogazione di servizi ispettivi.

Le positive esperienze condotte a livello internazionale hanno portato a una progressiva diffusione della cultura della manutenzione per la conservazione, nell'utente pubblico come in quello privato, alla costruzione di una legislazione orientata a supportare anche finanziariamente con dei sussidi la cura continua dei monumenti.

Le mura storiche urbane, attraverso le quali si pongono in relazione molteplici livelli di concezione/fruizione – paesaggio e cultura, spazio e tempo, identità e comunità, segni e valori, significati e percezioni –; contenitori e latori di memoria, identità, arte, storia che così fortemente connotano i territori e i paesaggi, ci interrogano oggi con improcrastinabile urgenza in termini di ricerca e di sperimentazione progettuale su quali possano essere i processi da attivare non solo per la sopravvivenza della consistenza materiale dei monumenti ma per il

mantenimento/miglioramento dei valori agli stessi connessi attraverso il progetto urbanistico e d'architettura per la costruzione di nuove funzioni e nuove qualità urbane.

*Michele Di Sivo, Daniela Ladiana*

# DIAGNOSTICA



## 7.

# METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN Y MONITORIZACIÓN DEL PATRIMONIO BASADO EN LA GESTIÓN CARTOGRÁFICA DIGITAL. LA MURALLA DE SEVILLA

JACINTO CANIVELL, ANTONIO JARAMILLO-MORILLA, JOSÉ EMILIO MASCORT-ALBEA, ROCÍO ROMERO-HERNÁNDEZ

### Sommario

La muralla histórica de Sevilla constituye uno de los símbolos urbanos más relevantes de la presencia musulmana en la ciudad. Su trazado de origen islámico y su gran extensión son fruto de la ampliación de la primigenia cerca romana. Sin embargo, la fortificación sufrió la demolición de gran parte de sus tramos, como consecuencia de las operaciones de ensanche que la urbe experimentó durante la segunda mitad del siglo XIX.

Este bien, declarado Monumento Nacional en 1908, también destaca por su naturaleza material, basada en la ejecución de tierra cruda apisonada mediante la técnica del tapial. Sin embargo, las restauraciones efectuadas en las últimas décadas no siempre se han realizado con sistemas constructivos acordes a los materiales básicos que conforman la muralla. Esta cuestión, unida a diversos factores, está generando problemas de deterioro progresivo en algunos de los sectores que se conservan en la actualidad. Por dicho motivo se ha planteado una colaboración con la Gerencia de Urbanismo de Sevilla con la finalidad de desarrollar un proyecto de investigación para el seguimiento progresivo de los futuros trabajos de intervención que se van a realizar sobre los tramos de muralla.

En este artículo se exponen las principales pautas del proceso metodológico del proyecto de colaboración mencionado, tomando como caso de estudio el tramo de la muralla de la Macarena. Dicha propuesta desarrollará un planteamiento multiescalar y pluridisciplinar, mediante el empleo de metodologías basadas en el uso de modelos digitales para la gestión del cono-

cimiento patrimonial. Éstos se sustentarán en la compatibilidad de sistemas CAD/SIG/BIM, a través del uso de la Gestión Cartográfica Digital (GCD) para el desarrollo integral de las tareas asignadas, que van desde la documentación e inventariado a la caracterización material y constructiva, pasando por cuestiones de percepción social.

De este modo, el resultado de los trabajos realizados se manifestará en el desarrollo de prototipos específicos de monitorización para conocer propiedades esenciales físicas y mecánicas de los materiales, así como en protocolos de caracterización y en catálogos arquitectónicos basados en las tecnologías de la información como medio esencial para la difusión y la transferencia del conocimiento generado.

Con esta propuesta metodológica se vuelve a poner de manifiesto la necesidad vigente de definir procedimientos sencillos para la conservación y el mantenimiento predictivo de los bienes culturales. Asimismo, un correcto desarrollo del modelo diseñado para la muralla histórica de Sevilla debe fundamentarse en un conjunto de criterios unificados que aporten coherencia gráfica, espacial y temática entre las diferentes unidades del modelo. Para ello se trabajará con muestras representativas a cada escala de trabajo que permitan una extensión del protocolo a la totalidad del bien analizado, concibiendo de este modo, una potente herramienta de control y difusión.

### **Parole chiave**

Arquitectura defensiva; técnicas constructivas en tierra; catalogación; caracterización técnica y sensorización; Gestión Cartográfica Digital (GCD); mantenimiento predictivo.

## **7.1. Introducción**

En la actualidad, el uso de modelos digitales para la gestión de la información relacionada con el patrimonio cultural constituye una línea de investigación muy relevante. Adicionalmente, la interoperabilidad entre diferentes herramientas como el Diseño Asistido por Ordenador (*Computer Aided Design, CAD*), y más reciente, el Modelado de Información para la Construcción (*Building Information Modelling,*

BIM) y los Sistemas de Información Geográfica (*Geographic Information Systems, GIS*) permiten aportar un control gráfico, paramétrico y espacial muy completo de los bienes culturales modelizados.

En base a dicho planteamiento, desde estas líneas se define la *Gestión Cartográfica Digital (GCD)* como el empleo de herramientas geográficas para la creación de bases de datos espaciales relacionadas con el patrimonio cultural, a través de una concepción multiescalar del uso de los GIS que va desde lo territorial y urbano hasta una escala arquitectónica que permita llegar a definir mediante entidades geográficas las principales componentes espaciales y arquitectónicas de un inmueble, así como los bienes muebles en ellos contenidos.

Precisamente, en el uso de técnicas geográficas a un nivel de detalle arquitectónico radica la novedad del presente planteamiento, pues de este modo, se permite completar un vacío de información existente en la mayoría de los visores espaciales y generar de un modo ágil y económico nuevos modelos digitales que analicen las particularidades de los bienes inmuebles, constituyendo una base sólida para posteriores desarrollos tridimensionales en modelos BIM o formatos CityGML (Mascort-Albea 2018).

A través de las experiencias desarrolladas en diversos casos de estudio, se ha demostrado que este tipo de modelos contribuyen a la conservación preventiva de los edificios históricos, entendida como un amplio espectro de carácter transversal que engloba tareas relacionadas con su documentación, análisis, diagnóstico, intervención, seguimiento y difusión. En este sentido destacan el uso de la GCD para el desarrollo de contenidos interactivos en aplicaciones turísticas de difusión patrimonial (Mascort-Albea *et al.* 2016), la catalogación de edificios en riesgo de abandono (Mascort-Albea and Meynier-Philip 2017) o el análisis multidisciplinar de tipologías históricas (Mascort-Albea 2017). Partiendo de las anteriores consideraciones, en el presente artículo se plantean las bases estratégicas que conducen a la aplicación de este planteamiento metodológico al seguimiento predictivo de la muralla histórica de Sevilla.



De este modo, la fortificación de la ciudad de Sevilla en época medieval se componía de un castillo urbano que llegó a ocupar un recinto de 17 hectáreas y de una cerca amurallada, que durante el periodo de dominio almohade alcanzó una ocupación de 273 hectáreas. Esta muralla de origen islámico, terminada de construir a principios del siglo XIII englobaba el perímetro de la primigenia cerca romana, que carece de restos visibles en la actualidad (Valor Piechotta 2014).

Durante los siglos posteriores, la muralla urbana de Sevilla se encontró sometida a transformaciones parciales, relacionadas en muchos casos a reparaciones de lienzos y a la renovación de sus puertas. No obstante, a lo largo del siglo XIX el monumento experimentará la actuación que ha condicionado de forma más dramática su estado actual (Morales 2013; Suárez Garmendia 1986). En este momento histórico se inicia un continuado proceso de demolición de sus tramos, de modo que de los más de 6.000 metros de perímetro original, en la actualidad solo quedan exentos y en pie aproximadamente unos 2.000 metros (Valor Piechotta 2014), de los cuales una parte significativa corresponde al sector localizado en la zona norte del antiguo recinto histórico, ubicado entre las antiguas puertas de Córdoba y de la Macarena (Figura 1).

Este tramo, conocido con el nombre de Muralla de la Macarena, fue declarado Monumento Histórico Nacional el 20 de enero de 1908 en el número 20 de la Gaceta de Madrid. Precisamente, esta consideración fue solicitada con el fin de evitar que este lienzo fuese objeto de un nuevo derribo (Suárez Garmendia 1986).

En relación a su naturaleza material, estas fortificaciones de origen almorávide o almohade en su mayoría, fueron edificadas mediante una técnica constructiva conocida como tapial. Aunque estas tribus del norte de África no fueron los primeros en emplearla, sí que fueron unos de los colectivos que mejor la desarrollaron y adaptaron para muchos usos (Daza et al. 2002). Especialmente fue en la poliorcética donde tuvo mayor difusión a partir de los siglos XII-XIII, encontrándose un amplio y diverso patrimonio militar constituido por

murallas urbanas, castillos y torres, construidos casi en su totalidad con esta técnica.

**Figura 1.** (a) Representación del trazado completo de la muralla histórica de Sevilla (b) Trazado actual del sector Macarena (c) Fotografía actual del estado general de los lienzos de la muralla de la Macarena. Elaboración propia a partir de información proporcionada por la Infraestructura de Datos Espaciales de Sevilla (IDE Sevilla) en su aplicación pública, titulada Catálogo General de Patrimonio Histórico Andaluz en Sevilla: [http://sig.urbanismosevilla.org/jsapi/ideS/SocialMediaViewer/index\\_BIC.html?webmap=e18ed1ee72694170bd0788245c70f57a&showAboutDialogOnLoad=true](http://sig.urbanismosevilla.org/jsapi/ideS/SocialMediaViewer/index_BIC.html?webmap=e18ed1ee72694170bd0788245c70f57a&showAboutDialogOnLoad=true).



Al hablar de tapial, nos referimos a una técnica encofrada para levantar muros, donde en el interior de unas denominadas puertas, previamente ajustadas y fijadas mediante un variado instrumental (codales, fronteras, agujas y tensores), se apisona un material normalmente conformado por tierra, con una determinada humedad que facilitaba alcanzar su mejor compactación. Mientras que los muros de edificaciones domésticas o civiles rondan los 40-60 cm, en el caso de las fortificaciones, se llega a superar ampliamente el metro de grosor. Por este hecho, y buscando una mayor eficiencia en la ejecución, los musulmanes adaptaron el sistema, colocando medias agujas en lugar de las pasantes, sobre las que apoyan los encofrados. Para la fijación

del sistema se empleaba un conjunto de puntales internos y tensores que quedaban perdidos en la masa. Con vistas a poder ejecutar un mayor volumen, los encofrados se realizaban corridos, dejando juntas inclinadas entre distintas fases. Estas particularidades, unidas a los condicionantes del entorno por la dificultad de acceso a ciertos recursos materiales (como la piedra) y a la necesidad de realizar una construcción de forma rápida por la presión militar de los reinos cristianos, condicionaron el desarrollo de esta técnica de construcción con tierra.

Los actuales planes de conservación regionales (Pada 2009) han contemplado e intervenido en algunos recintos fortificados, tanto en tapia como en otras técnicas. Sin embargo, el gran grueso de bienes queda en manos de las administraciones locales y municipales, que corren el riesgo de actuar sin criterios patrimoniales consensuados o lo que es peor, aplicando técnicas de restauración que se han demostrado sobradamente incompatibles con el curso de los años. Desde la década de los 80, las primeras intervenciones en Niebla (Guarner 1983) o las de Sevilla (García-Tapial, Méndez, and Cabeza Méndez 1986, 1989; García-Tapial, Cabeza Méndez, and Méndez 1988), hasta las más recientes (García-Tapial 2006; López Vicente and Vicente 2009; López Martínez and Martínez 1996; Martínez and López Martínez 2012; A. Graciani and Canivell 2014; Canivell and Graciani 2014) han demostrado cómo el empleo de materiales como el cemento *Portland* o el acero no solo no consiguen solucionar el proceso patológico, sino que empeoran el estado de conservación, requiriendo mayores inversiones para solventar los nuevos procesos.

En el referido caso de la Muralla de Sevilla, el tramo más singular corresponde al de la Macarena; 500 metros exentos de lienzos, antemuros o barbicanas, con torres, puertas y portillos. Tras varias campañas de intervenciones llevadas a cabo en los años 80, 90 y en el primera década del siglo XIX, la conservación ha sido una labor puntual, sin estar ligada a un plan de mantenimiento y conservación, lo que unido a una respuesta deficiente de ciertas intervenciones, ha derivado en un estado de conservación deficiente. Abundan las

erosiones, pérdidas de material, arenizaciones, suciedad y residuos, pérdidas de cohesión o desprendimientos parciales de bloques y merlones. Aunque estas afecciones no desestabilizan estructuralmente esta gruesa fábrica, sí desvirtúan totalmente este bien patrimonial reconocido y protegido, e incluso puede afectar accidentalmente a la integridad de viandantes, ya que los lienzos lindan directamente con un viario público peatonal.

Por lo tanto, es necesaria una mirada integral para la conservación, mantenimiento y difusión de sus valores. Actualmente, esto pretende canalizarse mediante la colaboración entre el Ayuntamiento de Sevilla (Gerencia de Urbanismo) e investigadores de la Universidad de Sevilla, que permitirá plantear un procedimiento metodológico para un seguimiento progresivo de los futuros trabajos sobre el monumento. Este desarrollo cubriría las principales fases en este tipo de proyectos de intervención: análisis, diagnóstico, intervención, seguimiento y difusión de los trabajos.

## 7.2. Objetivos

Los principales objetivos de la metodología propuesta son los siguientes:

- Desarrollar un marco metodológico común para evaluar los lienzos existentes de la Muralla de Sevilla, que esté basado en una documentación, caracterización y monitorización y gestionado mediante modelos cartográfico-digitales. Dicha cuestión servirá de base para (1) mejorar la gestión del conocimiento adquirido a cerca de este bien patrimonial, (2) conocer y diagnosticar el estado actual de conservación y (3) establecer criterios de actuación unitarios, adaptados y más eficaces.

Como objetivos específicos del procedimiento metodológico se pretende:

- Evaluar los riesgos y vulnerabilidades de la muralla con la intención de establecer los sectores críticos y la prioridad de las intervenciones.

- Desarrollar una herramienta para gestionar el mantenimiento de los lienzos, basado en un procedimiento de monitorización de parámetros físico-mecánicos y en los mismos modelos cartográfico-digitales.
- Generar una herramienta que, basada en uso de modelos interactivos cartográfico-digitales y plataformas web de carácter institucional, sirva para la difusión de los valores patrimoniales de la Muralla de Sevilla.

### 7.3. Fases metodológicas

El procedimiento metodológico propuesto se desarrollará en las siguientes fases.

- a. Fase documental: Recopilación previa de documentación histórica y evolución de la muralla, así como de los expedientes técnicos de restauración llevados a cabo y sus planteamientos técnicos propuestos. Igualmente se recopilará y analizará la documentación sobre intervenciones arqueológicas.
- b. Fase de digitalización: Partiendo de la documentación gráfica disponible (principalmente, plantas y alzados) provenientes de los expedientes técnicos consultados, se elaborará una cartografía de base detallada. Especialmente relevante serán los alzados de los estudios paramentales provenientes de los expedientes arqueológicos, donde se detallan aspectos concretos del estado actual de los lienzos.
- c. En caso de no disponer de planimetría detallada o previamente digitalizada, se empleará un escaneado digital y la elaboración de una malla por nube de puntos mediante la técnica de fotomodelado. Como resultado se obtendrán no solo la volumetría, sino las rectificaciones fotográficas de cada alzado con texturas reales.
- d. Partiendo de la base cartográfica digital desarrollada por la Gerencia de Urbanismos de Sevilla (GUS), se completarán

- las particularidades no consideradas en determinados elementos (lienzos, barbancas o torres).
- e. Diseño de la estructura del sistema de gestión cartográfica digital (GCD). En base al procedimiento de caracterización y evaluación llevado a cabo por Canivell (Canivell and Graciani 2015; Canivell 2012) y de representación cartográfica a escala arquitectónica propuesto por Mascort-Albea (Mascort-Albea 2018, 2017), se estructurará una base de datos georreferenciada con los nuevos parámetros necesarios para la monitorización. La base de datos recogerá parámetros de índole descriptivo, constructivo y material. Al mismo tiempo se realizará una ficha tipo de toma de datos.
  - f. Asimismo, se diseñará una sectorización de los lienzos y torres en unidades lógicas a anidados a diferentes niveles, que formarán un árbol jerárquico relacionado, donde se volcarán los datos recabados por medio del trabajo en campo y mediante la documentación.
  - g. Fase de toma de datos. En sucesivas visitas con toma de datos se comprobará y actualizará la planimetría disponible. En un segundo periodo, se realizarán los estudios mediante métodos de inspección no destructivos, como la termografía y el georradar, aunque estos datos serán analizados en una fase posterior. Finalmente, una vez determinados los sectores vulnerables, se extraerán muestras para ser caracterizadas y analizadas en laboratorio.
  - h. Fase de caracterización y sensorización. Se elaborará una evaluación preliminar de primer nivel del estado de conservación actual y vulnerabilidades con la finalidad de establecer los sectores más críticos. A continuación, y partiendo de las muestras de materiales de la fase anterior, se elaborarán los ensayos de caracterización de las muestras.
  - i. Paralelamente, se diseñará un prototipo de sensores basados en tecnologías *Open Access* para la monitorización de parámetros físicos-mecánicos de los lienzos (presión, humedad

relativa y desplazamientos de las fábricas, así como datos climatológicos del entorno).

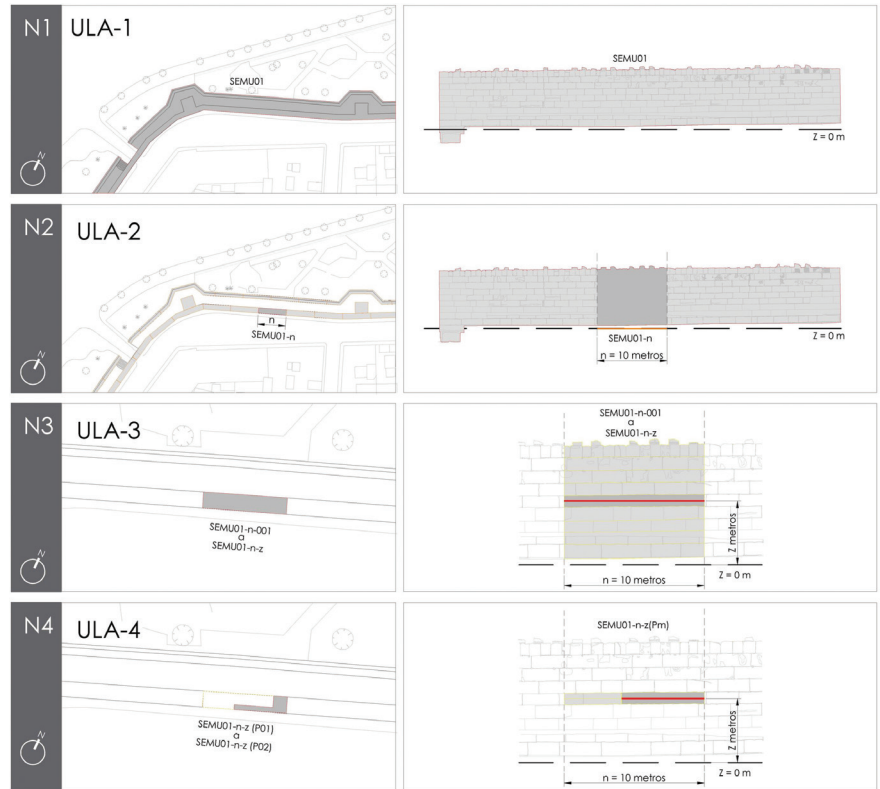
- j. Volcado de datos, actualización y análisis. Se considera el volcado de la información en el sistema GCD desarrollado, tanto los datos correspondientes a la inspección, como los de los ensayos de laboratorio y métodos de inspección. A continuación se actualizarán los parámetros y factores del sistema GCD para realizar una evaluación de riesgos de segundo nivel más precisa, con la que se establecerán los sectores críticos, estrategias de actuación y planificación de un protocolo de conservación y mantenimiento preventivo.
- k. Fase de transferencia y difusión de resultados. En base al sistema GCD y seleccionando los contenidos, se elaborará una guía interactiva relativa a través de una web institucional sobre los valores patrimoniales y museológicos del bien patrimonial. De este modo, los resultados serán revertidos, tanto a la ciudadanía como a aquellos técnicos especializados relacionados con la conservación del patrimonio construido en tierra. Para dicha labor de transferencia se emplearán las herramientas y plataformas institucionales de datos abiertos que la GUS tiene habilitadas para tal fin.

#### **7.4. Estructura y herramientas del sistema GCD**

En primer lugar, es necesario definir el concepto de unidad lógica de análisis (ULA), que es el componente básico del procedimiento metodológico propuesto. Esta unidad es un elemento escalable que corresponde a una entidad geográfica puntual, lineal o poligonal. La clave reside en cómo se conectan y relacionan entre sí las diferentes ULAs, y en su correspondencia con la concepción constructiva de estos muros de tapia. En la Figura 2 se describen gráficamente estas relaciones. Se establecen 4 niveles anidados, N1 a N4. A cada nivel corresponde una ULA y unos atributos por medios de tablas de datos. Cada ULA se identifica con un código alfanumérico, que hace

referencia a la provincia, el tipo de edificación y primer código numérico. El primer nivel (N1) corresponde a la ULA general (ULA-1, para el caso de la Muralla de la Macarena sería SEMU01), un shape poligonal normalmente asociado a una cota  $Z=0$  metros que engloba todo el perímetro del objeto, en este caso la muralla de la Macarena (torres, lienzos y barbacanas).

**Figura 2.** Relaciones espaciales que se establecen entre las distintas unidades lógicas de análisis (ULAs). Elaboración propia.



Este nivel se subdivide en varios tramos que constituyen el nivel N2 y un conjunto de ULAs (ULA-2, por ejemplo SEMU01-n, donde  $n$  es un número correlativo de 0 a  $n$ ), que nuevamente corresponden a entidades poligonales de longitud variable “ $n$ ” metros y asociados también a una cota  $Z=0$  metros. La extensión de las unidades podría



abarcar desde lienzos completos a tramos más reducidos. Para el caso de la Macarena se han tomado 10 metros, ya que siendo dos codos mamunies  $2 \times 47,12$  cm (Roldán-Medina and Roldán-Medina 2015) –esta medida es el módulo (alto) del cajón almohade (Amparo Graciani and Tabales 2008)–, si se dividen las longitudes libres de lienzos entre torres, obtenemos divisiones aproximadas a 3, 4 o 5 sectores. Los restos hasta completar la longitud del lienzo se dejan ambos lados de las torres, siendo estos otras ULA-2. En cualquier caso, el parámetro  $m$  se puede ajustar según la escala y precisión que se quiera desarrollar. Cada torre se identifica con una ULA-2.

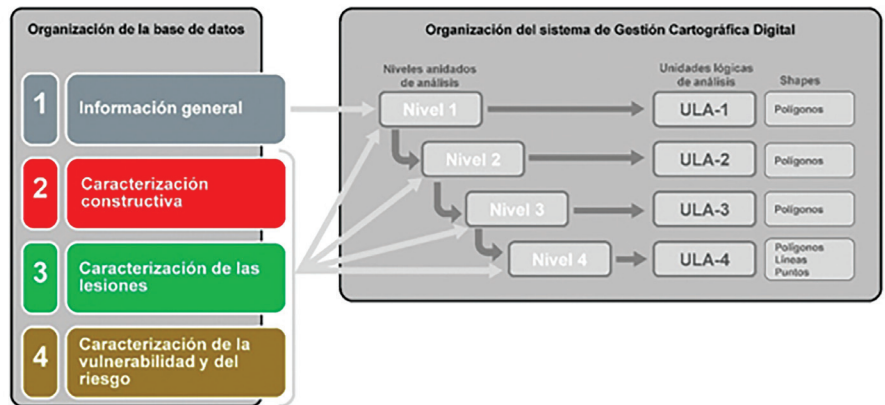
El siguiente nivel anidado N3 corresponde a una ULA (ULA-3, ejemplo SEMU01-n-z, siendo  $z$  una cota positiva o negativa en centímetros en referencia a una rasante cero preestablecida) de geometría poligonal. Estas unidades dividen la ULA-2 en sectores horizontales superpuestos que representan cada uno de los hilos de la fábrica de tapia. Por ello, como el alto del hilo o módulo de la fábrica suele rondar los dos codos mamunies, están separados unos 85-95 cm (85-90 cm para el caso de la Muralla de la Macarena). Por lo tanto, cada ULA-3 tiene asociada una cota  $Z$  diferente y un tramo vertical de muro variable. Por último, el nivel N4 (ULA-4, ejemplo SEMU01-n-z-(Pm/Lm/Dm) donde  $P$ ,  $L$  y  $D$  son elementos polígono, línea o punto respectivamente, y  $m$  es un número correlativo entre 0 y  $m$ ) define detalles dentro de las ULA-3, por lo que en este caso las entidades geográficas serán polígonos, líneas o puntos contenidos en la forma ULA-3. Estas unidades se pueden asociar a cambios de la técnica constructiva, de materiales o presencia de lesiones que afecten parcialmente a la ULA-3.

Este árbol de relaciones no es necesario desarrollarlo por completo para toda extensión del bien. Su nivel de precisión puede ser adaptado según las necesidades de mantenimiento, monitorización o conservación, o a los recursos disponibles. Así, por ejemplo, en determinados tramos con peor estado de conservación o en los que hayan de colocarse dispositivos de monitorización, se podrá profundizar en

el árbol de anidado de ULA y dejar otros sectores con un nivel de caracterización más sencilla.

Para cada nivel anidado se aportarán tablas de datos asociadas, según se detalla en la Figura 3. En términos generales, la tabla de identificación general –que contiene datos de localización, datación, contexto, intervenciones, etc...– sirve de nexo de relaciones con otras tablas que contendrán datos constructivos (técnicas y materiales), a cerca del estado de conservación (lesiones y causas), sobre las vulnerabilidades (evaluación de factores de riesgo) y la monitorización (datos de sensores).

**Figura 3.** *Parámetros destinados a la caracterización de las unidades geográficas. Elaboración propia.*



## 7.5. Conclusiones

Dada la necesidad vigente de definir procedimientos sencillos para la conservación y el mantenimiento predictivo de los bienes culturales, se plantean estrategias encaminadas al uso generalizado de los GIS a una escala arquitectónica. A través de la GDC se aporta un planteamiento metodológico que fomenta el empleo de las herramientas geográficas para la caracterización detallada de la arquitectura patrimonial. Si bien dicho procedimiento puede ser desarrollado mediante herramientas de software libre, también pueden adquirir mayor presencia a través del uso de GIS corporativos y la creación de modelos BIM.

De este modo, se está generando un catálogo de datos espaciales a escala arquitectónica relativos a la muralla histórica de Sevilla, destinado a la conservación preventiva de dicho bien cultural. A través de dicho trabajo, se ha diseñado un modelo predictivo que se adapta a las necesidades del proyecto, los recursos existentes y la particular naturaleza del caso de estudio.

En este sentido, la importancia de establecer criterios unificados queda patente en el planteamiento realizado. Al desarrollar una estrategia metodológica que busca integrar diferentes escalas de resolución y componentes disciplinares, se requiere que el desarrollo de los trabajos adquiera un alto grado de coherencia gráfica, temática y terminológica.

Por otro lado, la información generada se estructurará a través de diferentes componentes temáticas, que debido a su naturaleza transversal servirán como herramienta de trabajo interno para el control y seguimiento del estado material del bien, y adicionalmente, se podrá emplear como instrumento de difusión y musealización del monumento mediante el posterior desarrollo tecnológico de aplicaciones digitales.

Finalmente, se observa como el caso de estudio se adecua a los límites de un trabajo que pretende funcionar como un episodio piloto. Para tal fin, se ha realizado una selección preliminar de elementos representativos para cada unidad de trabajo, de modo que puedan resultar suficientemente significativos para poder extender el modelo creado a la totalidad de los lienzos de la muralla histórica de la ciudad.

## **Agradecimientos**

Los autores quieren expresar su agradecimiento a aquellos agentes e instituciones que han mostrado interés por el presente trabajo, especialmente a la Gerencia de Urbanismo de Sevilla, a través de su Servicio de Renovación Urbana y Conservación de la Edificación, y su Infraestructura de Datos Espaciales de Sevilla. A su vez, el V Plan

Propio de Investigación la Universidad (IDE Sevilla) ha colaborado en la financiación relativa a la redacción de la propuesta.

## Referencias

- Canivell J., *Characterization Methodology to Efficiently Manage the Conservation of Historical Rammed-Earth Buildings*, in *Rammed Earth Conservation*, edited by C. Mileto, F. Vegas, V. Cristini, Rammed Earth Conservation, London, Taylor & Francis Group, 2012, pp. 283-288.
- Canivell J., Graciani A., *Constructive Characterization of Historical Rammed-Earth Walls in Almohad Fortresses in the Ancient Reign of Seville*, in «Arqueología de La Arquitectura», 12, 2015, <https://doi.org/10.3989/arq.arqt.2015.003>.
- Canivell J., Graciani A., *Muralla de Sevilla (1984-2008)*, en *La restauración de la tapia en la Península Ibérica : criterios, técnicas, resultados y perspectivas*, 2014, <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4924184>.
- Daza P.G., Sáez Rodríguez A.J., *Tapial o Fábricas Encofradas En Recintos Urbanos Andalusíes*, en *II Congreso Internacional "La Ciudad En Al-Andalus y El Magreb"* Algeciras, 2002, Granada, Fundación Legado Andalusi, pp. 561-626.
- García-Tapial J., *Proyecto de Rehabilitación de La Muralla de La Macarena (Sector Puerta de Córdoba) Fase III*, Sevilla, 2006.
- García-Tapial J., Cabeza Méndez J.M., *Restauración de La Murallas de La Macarena*, en «Aparejadores: Boletín Del Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Sevilla», 20, 1986, pp. 9-17.
- García-Tapial J., Cabeza Méndez J.M., *Restauración de Las Murallas Del Jardín Del Valle*, en «Aparejadores: Boletín Del Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Sevilla», 26, 1988, pp. 26-31.
- García-Tapial J., Cabeza Méndez J.M., *Recuperación de La Cerca Almohade de La Ciudad de Sevilla En El Recinto de La Casa de La Moneda*, en «Archivo Hispalense», 72(220), 1989, pp. 291-297.
- Graciani A., Canivell J., *Revisión de Las Intervenciones En Fábricas de Tapia En Andalucía Occidental*, en *Restauración de La Tapia En La Península Ibérica. Criterios, Técnicas, Resultados, Perspectivas*, edited by F. Mileto, C., Vegas, General de Ediciones de Arquitectura, 2014, pp. 30-41.
- Graciani A., Tabales M.A., *El Tapial En El Área Sevillana. Avance Cronotipológico Estructural*, en «Arqueología de La Arquitectura», 5, 2008, pp. 135-158.
- Guarner I., *La Restauración de La Muralla de Niebla*, en «El Croquis», 14, 1983, pp. 8-9.

- López Martínez F. J., *Tres Experiencias de Intervención Sobre Obras de Tapia, En Murcia, en Actas Del III Congreso Internacional de Rehabilitación Del Patrimonio Arquitectónico y Edificación. Congreso Internacional de Rehabilitación Del Patrimonio Arquitectónico y Edificación*, Granada, 1996, Madrid, Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo, pp. 379-383.
- López Vicente M., *Proyecto Básico y de Ejecución de Reparación de Las Murallas de Niebla, Huelva* [No Publicado], 2009.
- López Martínez F.J., 2012. *Restoration of Rammed Earth Structures*, en *Rammed Earth Conservation*, Mileto, Vegas & Cristini (Eds.), London, Taylor & Francis Group, 2012, pp. 21-27.
- Mascort-Albea E. J., *Mapas Para El Patrimonio: Caracterización Técnica de Las Iglesias Medievales de Sevilla Mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG)*, Universidad de Sevilla, 2018, <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/70745>.
- Mascort-Albea E.J., Meynier-Philip M., *Strategies for Conservation of Religious Heritage in the Metropolitan Area of Lyon/Saint-Étienne (France). Short Research Stay and Methodological Transfer*, en *IDA 2017. 1st International Congress on Advanced Doctoral Research in Architecture*, Sevilla, España, Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Universidad de Sevilla, 2017, pp. 675-684, <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/70006>.
- Mascort-Albea E.J., Ruiz-Jaramillo J., López Larrínaga F., de la Peña Bernal A., *Sevilla, Patrimonio Mundial: guía cultural interactiva para dispositivos móviles*, en «Revista PH», 90 (October), 2016, pp. 152-68, <http://www.iaph.es/revistaph/index.php/revistaph/article/view/3778>.
- Mascort-Albea Emilio J., *Datos geográficos abiertos para la conservación preventiva del patrimonio arquitectónico*, en «Revista PH», 92, 2017, pp. 228-229, <http://www.iaph.es/revistaph/index.php/revistaph/article/view/3948#.Wed111u0PIU>.
- Morales A.J., *Un Episodio En El Derribo de Las Murallas de Sevilla*, en «Laboratorio de Arte», 25(2), 2013, pp. 689-700, [http://institucional.us.es/revistas/arte/25/vol\\_II/art\\_9.pdf](http://institucional.us.es/revistas/arte/25/vol_II/art_9.pdf).
- Pada, *Plan de Arquitectura Defensiva de Andalucía (PADA)*, 2009, <http://www.juntadeandalucia.es/organismos/cultura/areas/bienes-culturales/programas-conservacion/paginas/programa-conservacion-pada.html>.
- Roldán-Medina F.J., *Análisis Antropométrico de La Mezquita-Catedral de Córdoba*, en «Informes de La Construcción», 67(539), 2015, e093. <https://doi.org/10.3989/ic.14.024>.
- Suárez Garmendia J.M., *Arquitectura y Urbanismo En La Sevilla Del Siglo XIX*, Sevilla, España: Diputación Provincial de Sevilla, 1986.

Valor Piechotta M., *La Muralla Medieval de Sevilla. Otra Interpretación*, en *Sevilla Arqueológica. La Ciudad En Época Protohistórica, Antigua y Andalusí*, edited by José Beltrán Fortes and Oliva Rodríguez Gutiérrez, Sevilla, España: Ayuntamiento de Sevilla; Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, 2014.