



## PROGRAMMA DI RICERCA STM 2016

### Progetto di ricerca Tecnologie e strumenti di diagnostica e conservazione: la Ciudad Amurallada di Cartagena (Colombia)

#### Proponente

Nicola Masini

Primo Ricercatore CNR – Istituto per i Beni Archeologici e Monumentali (IBAM)

#### Fruitore

Manuela Scavone

Borsista CNR – Istituto per i Beni Archeologici e Monumentali (IBAM)

#### Istituzione straniera ospitante

Jorge Luis Alvarez Carrascal

Universidad de Cartagena, Facultad de Ingeniería – Grupo de investigación ESCONPAT

### Relazione scientifica





## Perché Cartagena de Indias?

Lo straordinario valore culturale, la complessità architettonica e l'importanza internazionale hanno orientato la scelta del progetto di Short Term Mobility (STM) sulla città fortificata di Cartagena de Indias (Colombia) che, con uno dei più estesi e complessi sistemi di fortificazioni militari dell'America del Sud, nel 1984 è stata dichiarata Patrimonio Mondiale dell'Unesco.

Tale scelta è legata all'importante rapporto di collaborazione, scientifica e di ricerca, e alle esperienze già avviate negli anni, tra il CNR-IBAM e la realtà universitaria e di ricerca Colombiana che hanno creato in parallelo le basi per un'efficace azione indirizzata allo sviluppo di tecnologie per la conoscenza, la valorizzazione e il restauro del patrimonio architettonico.

Il progetto di STM, infatti, si inquadra all'interno dell'Accordo di cooperazione scientifica e tecnologica tra il CNR-IBAM, l'Università di Cartagena e l'Università della Basilicata firmato nel 2012 e finalizzato all'applicazione di metodi innovativi per gli interventi di conservazione del patrimonio storico.

L'attività è stata svolta nel periodo dal 4 al 25 giugno 2016. Dal 7 al 12 giugno le attività sono state svolte in collaborazione con il Dott. Nicola Masini, la Dott.ssa Maria Sileo ed il Dott. Antonio Pecci, gruppo di ricerca del CNR-IBAM in missione a Cartagena nell'ambito del progetto *“Tecnologie e strumenti di diagnostica e conservazione degli insediamenti fortificati di Cartagena de Indias (COL) e Acaia (ITA)”* finanziato dall'Accordo bilaterale per il biennio 2015-2016.

## Cartagena: storia e descrizione architettonica

Situata in una baia del Mar dei Caraibi, la Ciudad Amurallada di Cartagena è il più ampio insediamento fortificato del Sud America di età coloniale. La costruzione delle spesse mura ha inizio alla fine del XVI secolo. Fino ad allora Cartagena era praticamente quasi del tutto sprovvista di difese e nel 1586, il più famoso ingegnere militare al servizio della Corona Spagnola, Battista Antonelli, dà inizio al progetto di fortificazione della città. I lavori che vengono completati nel XVII secolo rendono Cartagena una roccaforte inespugnabile. Le mura, straordinaria opera di ingegneria militare, risultano ben conservate, ad eccezione della sezione del quartiere la *Matuna* demolita intorno alla metà del XX secolo.

La cinta muraria, con uno sviluppo planimetrico di circa 10 km ed altezza variabile tra i 6 e i 10 m, è costituita da numerosi baluardi, torri e bastioni eretti in posizioni strategiche che rendono la struttura architettonica complessa ed articolata.

Partendo dalla *Torre del Reloj* o *“Boca del Puente”*, punto di ingresso al centro storico della città, il cordone murario si sviluppa con il *Baluarte di San Juan Bautista* e il *Baluarte de San Ignacio* ascrivibili alla prima fase costruttiva, di epoca rinascimentale e con configurazione planimetrica regolare. Si prosegue poi con il *Baluarte de San Francisco Javier* e il *Baluarte di Santiago* collegati tra loro e con il successivo *Baluarte de Santo Domingo* mediante ponti di legno.

Il *Baluarte de Santo Domingo*, il primo ad essere costruito tra il 1614 e il 1616, è affiancato dal *Baluarte de Santiago* a sinistra e dal *Baluarte de la Cruz* a destra. Con forma planimetrica perfettamente simmetrica e regolare presenta diversi elementi architettonici tra cui il muro a scarpa inclinato, la rampa di accesso, la torre angolare, il parapetto merlato per l'inserimento dei cannoni di artiglieria e la porta, detta *Puerta de Santo Domingo*, che consente l'ingresso nella *Ciudad Amurallada*. La cortina muraria lo collega al *Baluarte de la Cruz*, gravemente danneggiato nel 1697 e successivamente ricostruito con caratteristiche analoghe al successivo *Baluarte de la Merced* caratterizzato dal muro a scarpa inclinato e da 2 torri angolari. Il collegamento con il successivo *Baluarte de Santa Clara* è stato realizzato mediante una cortina muraria costruita nel 1616 e



successivamente rinforzata nel 1725 che attraverso la *Puerta del Boquetillo* consente l'ingresso nella città. Tale porta è affiancata sul lato destro dal *Baluarte de Santa Catalina* costruito tra il 1780 e il 1789 e collegato con il *Baluarte de San Lucas*, realizzato nel 1673 e successivamente ampliato nel 1798, a cui segue il *Baluarte de San Pedro Martir* realizzato tra il 1630 e il 1683 e punto iniziale della cortina demolita negli ultimi decenni.

Nella parte finale, verso il quartiere dei *Getsemani*, la cinta muraria è costituita dai baluardi *de San Miguel*, *de Santa Teresa*, *de Santa Barbara*, *de San José* e *del Reducto* intervallati da cortine murarie e realizzati in epoche successive tra il 1631 e il 1741.



Fig. 1: Immagine aerea e localizzazione lungo la cinta muraria dei principali baluardi (1. *Baluarte de San Juan Bautista*; 2. *Baluarte de San Ignacio*; 3. *Baluarte de San Francisco*; 4. *Baluarte Santiago*; 5. *Baluarte de Santo Domingo*; 6. *Baluarte de la Cruz*; 7. *Baluarte de la Merced*; 8. *Baluarte de Santa Clara*; 9. *Baluarte de Santa Catalina*; 10. *Baluarte de San Lucas*; 11. *Baluarte de San Pedro Martir*; 12. *Baluarte de San Miguel*; 13. *Baluarte de Santa Teresa*; 14. *Baluarte de Santa Barbara*; 15. *Baluarte de San José*; 16. *Baluarte del Reducto*.)

## Il progetto e gli obiettivi

Il progetto ha permesso di sperimentare una metodologia di indagine basata sull'integrazione di attività di ricerca storica, documentaria, archivistica, bibliografica ed iconografica finalizzata alla conoscenza dell'impianto architettonico ed urbanistico della città fortificata, delle dinamiche evolutive e delle numerose fasi costruttive.

È stata poi condotta la campagna di rilievo architettonico (fotografico, fotogrammetrico e geometrico) dell'intero complesso fortificato con l'analisi delle strutture murarie e dei materiali costruttivi e il rilievo dei dissesti e delle patologie con l'elaborazione di un inventario delle principali forme di alterazione degrado rilevate.

Infine, è stato ipotizzato lo sviluppo e l'implementazione di strumenti che consentano di raccogliere i risultati sperimentali, la documentazione d'archivio, le schede descrittive prodotte in fase di analisi e di collegarli a mappe digitalizzate, modelli, ricostruzioni virtuali e rendering ad alta risoluzione, con scopo divulgativo e per un'ampia fascia d'utenza.

L'obiettivo principale del progetto avviato a Cartagena è stato la sperimentazione di una metodologia di indagine speditiva per la conoscenza storico-costruttiva e la diagnosi delle patologie di degrado di un esteso complesso architettonico.

Questo obiettivo è stato perseguito mediante una serie coordinata di obiettivi specifici orientati a:

- Ricerca storica, archivistica, documentaria e bibliografica
- Attività tecniche di rilievo architettonico, fotografico e fotogrammetrico
- Analisi dei materiali e delle tecniche costruttive



- Studio patologico e diagnostico con sistemi di misurazione
- Sviluppo di un piano di intervento, manutenzione e monitoraggio delle patologie
- Implementazione di un inventario delle patologie con proposte di intervento per ciascun caso rilevato
- Elaborazione di modelli tridimensionali fotorealistici e metricamente corretti

## Attività svolte

Le attività si sono articolate in due segmenti paralleli: attività finalizzate ad un'accurata indagine documentaria e bibliografica ed attività finalizzate al rilievo architettonico e fotografico del Cordon Amurallado del centro storico di Cartagena.

La ricerca storica effettuata presso la Sociedad de Mejoras Publicas ha permesso di visionare e studiare il fondo archivistico dell' "Area: Patrimonio Cultural" ed in particolare le seguenti serie:

- 1.2 Baluarte de Santo Domingo;
- 1.3 Baluarte de Santa Catalina;
- 1.4 Fuerte de San Fernando de Boca Chica;
- 1.5 Bovedas;
- 1.6 Baluarte de San Lucas;
- 1.7 Baluarte el Reducto;
- 1.8 Baluarte de San Miguel;
- 1.9 Baluarte de Santiago Apostol;
- 1.10 Baluarte de San Francisco de Javier.

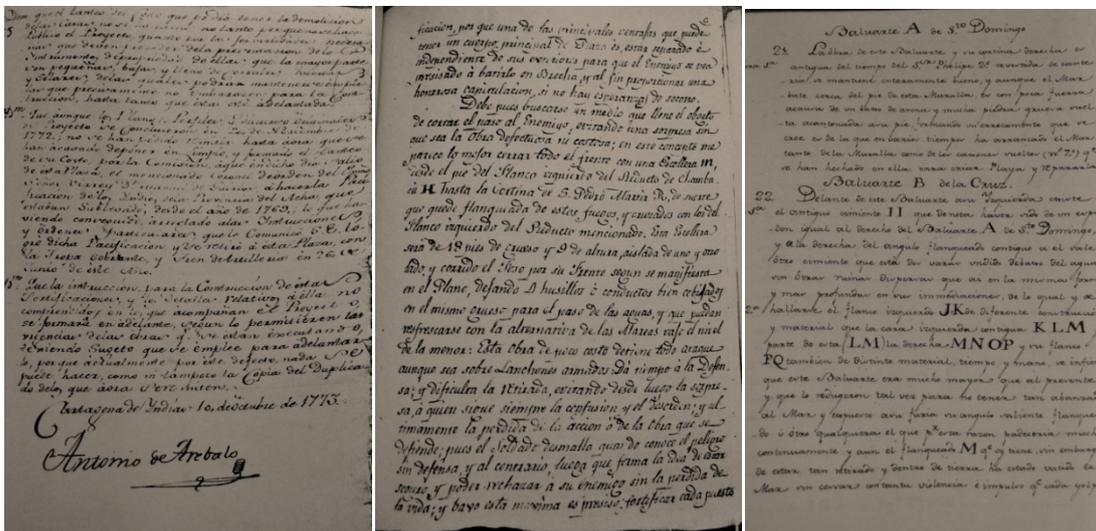


Fig. 2: Documenti in copia degli originali conservati presso l'Archivio storico di Madrid

Sono stati, inoltre, visionati e scansionati per una trascrizione, traduzione e schedatura futura, i seguenti documenti in copia degli originali conservati presso l'Archivio storico di Madrid:

- Anguiano, "Proyectos e informes sobre obras en la plaza de Cartagena", 1802-1810
- Arevalo, Sala y Donon, "Proyectos sobre canales", 1750-1892
- Arevalo, "Proyecto gral de las escolleras", 1762-1798
- Arevalo, "Discurso militar y proyecto para fortificar la plaza de Cartagena", 1772
- Arevalo, "Informes sobre el estado de obras de la plaza de Cartagena", 1772-1788



- Crame, “*Plan de defensa de la Plaza de Cartagena*”, 1778
- Crame, “*Plan de defensa dotacion de artilleria armas petrechos*”, 1778
- Mac Evans, Solis y Grimals, “*Proyectos generales sobre la plaza de Cartagena*”, 1744-1754
- Muñoz, “*Informe sobre las fortificaciones de la plaza de Cartagena*”, 1741-1802

A questi vanno aggiunte le pubblicazioni a stampa, generalmente testi rari ed antichi, conservati presso l'Archivio Storico di Cartagena, la Biblioteca dell'Università e la Biblioteca Bartolomé Calvo.

Le attività di rilievo sul campo sono state sviluppate con l'obiettivo principale di effettuare rilievi speditivi (terrestri ed aerei mediante UAV) per la documentazione e la ricostruzione tridimensionale della cinta muraria. In particolar modo, per documentare in maniera corretta la struttura della cinta muraria è stato realizzato un rilievo digitale mediante la tecnica di *image based* (fotogrammetria) che ha consentito una restituzione metrica tridimensionale dell'intera struttura, senza disporre di complesse attrezzature e con costi contenuti. Tale tecnica utilizza immagini da fotocamera digitale e fornisce come *output* modelli 3D; inoltre, ha permesso di ottenere un elevato numero di punti e con alta precisione e fedeltà al dato reale.

La campagna fotografica è stata realizzata con fotocamera digitale Nikon D90 con sensore da 12,3 megapixel che ha consentito di ottenere immagini estremamente dettagliate e di produrre ingrandimenti nitidissimi.

L'utilizzo di immagini ad alta risoluzione ha comportato da un lato un aumento dei tempi di calcolo ma dall'altro i tempi più lunghi sono dovuti alla presenza di un maggior numero di informazioni ed una maggiore accuratezza ottenibile nell'*output* finale.

È stata pianificata la campagna di ripresa fotografica al fine di acquisire tutto il complesso manufatto architettonico ma anche per ridurre il numero di fotografie da utilizzare in quanto una ridondanza di informazioni non avrebbe dato alcun beneficio in termini di qualità ma avrebbe inficiato negativamente sui tempi di elaborazione. In base all'altezza della cinta muraria è stato necessario effettuare le foto a 3 differenti quote in modo da inquadrare ogni porzione della superficie muraria per non creare delle lacune nei modelli finali.

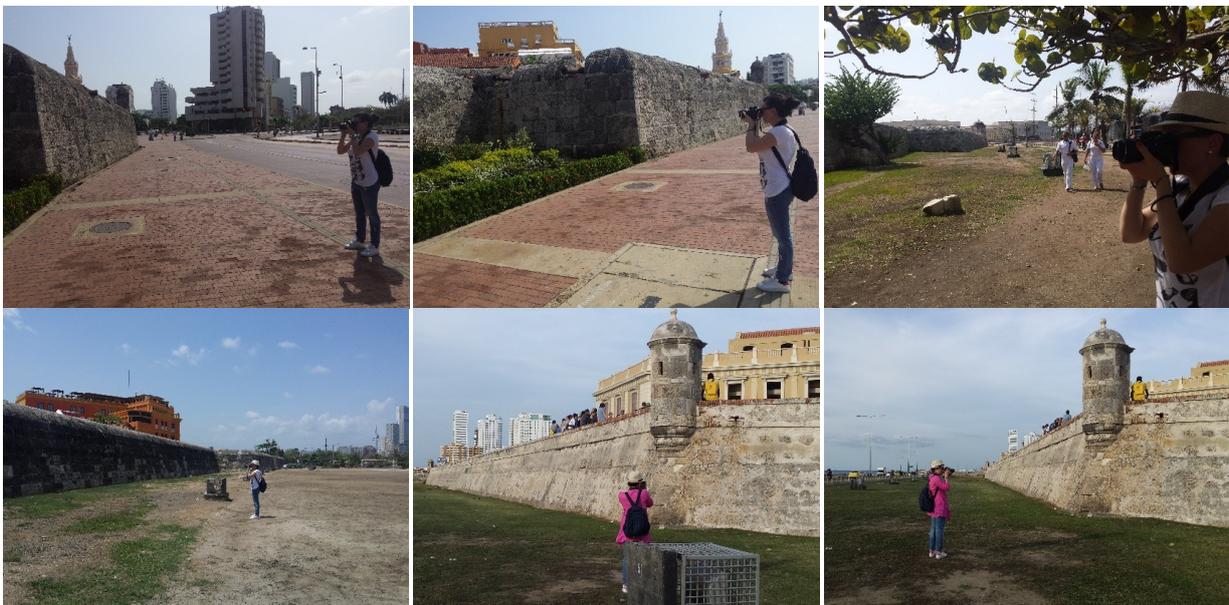


Fig. 3: Fase di acquisizione dei *dataset* fotografici terrestri

Le immagini, opportunamente ottimizzate e selezionate, sono state importate nel *software* di fotogrammetria digitale (Agisoft Photoscan) che, mediante l'individuazione dei punti omologhi, ha effettuato l'allineamento automatizzato e la generazione di una prima nuvola di punti nella quale è già possibile osservare l'area acquisita. Tale operazione è stata condotta parallelamente alla fase di acquisizione sul campo per verificare



che non ci fossero lacune e anomalie che, durante il successivo processamento condotto presso il CNR-IBAM di Tito Scalo, dopo il rientro in Italia, sarebbero irrimediabilmente rimaste tali. Infatti, le successive operazioni di calcolo sono state processate dopo il soggiorno in Colombia e sfruttando *hardware* estremamente performanti. È stata così calcolata la nuvola densa di punti rilevati dalla quale è stato possibile passare al calcolo della *mesh* poligonale prima e della *texture* ad essa collegata dopo.

L'acquisizione di dati metrici e geometrici, effettuata sul campo con metodi e strumenti tradizionali di rilevamento architettonico, ha consentito quindi di orientare e scalare correttamente il modello.

Uno degli obiettivi del progetto è stato condurre l'analisi patologica dell'intera cinta muraria. Pertanto, dal rilievo fotogrammetrico è stato ottenuto il modello metrico perfettamente texturizzato su cui sono state eseguite operazioni di rilievo, mappatura del degrado e vettorializzazione di tutte le forme di alterazione.

Attraverso un'attenta analisi delle scene estratte dal modello tridimensionale, l'*editing* sul modello 3D ha permesso di graficizzare differenti tipologie di informazioni, tra cui il degrado dei materiali, la presenza di vuoti nelle superfici murarie e il quadro lesionativo e fessurativo della struttura architettonica.



Fig. 4: Prime elaborazioni con il software di fotogrammetria digitale. Nuvola di punti e fotopiano dell'area della *Torre del Reloj*

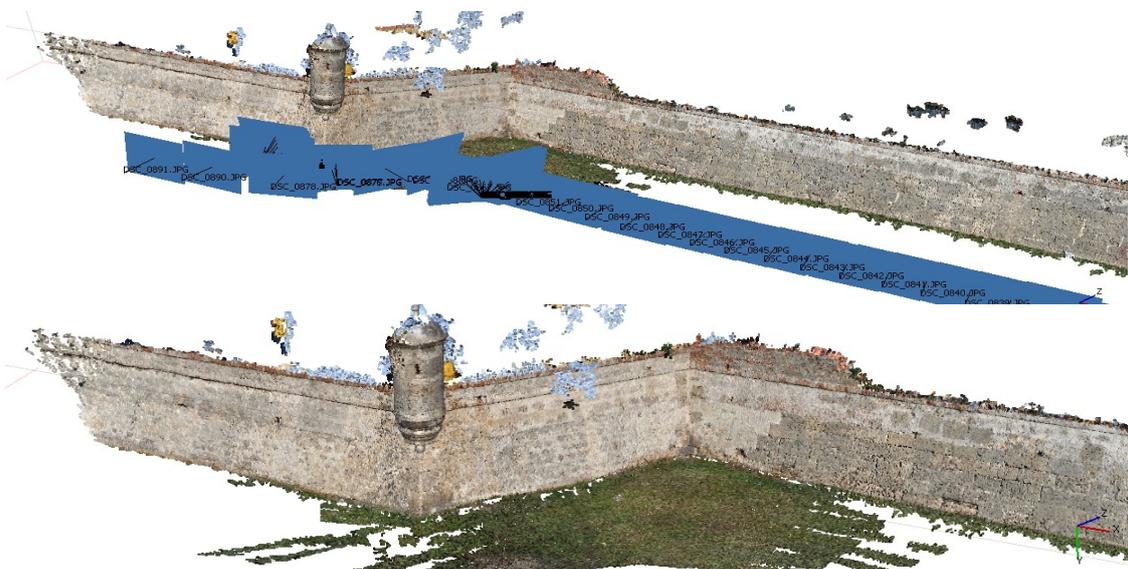


Fig. 5: Nuvola di punti e modello texturizzato dell'area tra il *Baluarte de la Cruz* e il *Baluarte de la Merced*



Le attività di rilievo sul campo hanno previsto anche l'impiego di un elicottero quadricotore radiocomandato di dimensioni ridotte ed a propulsione elettrica (Phantom DJI 2+) che con una camera da 14 megapixel ha permesso di scattare foto ed effettuare riprese video HD con una risoluzione di 1920-1080 pixel a 30 fps e di 720 p a 60 fps.

Per il rilievo dell'area di studio e per poter realizzare un modello 3D completo e dettagliato della cinta muraria sono state scattate con il drone un numero sufficiente di foto tale da avere una copertura fotogrammetrica totale della struttura. Sono stati progettati numerosi voli lungo direzioni differenti in quanto, in considerazione dello sviluppo planimetrico dell'area, si è scelto di disporre di differenti *datasets* che consentissero di massimizzare gli scatti acquisiti e di integrare il modello finale con le immagini acquisite da terra.

I voli di acquisizione sono stati effettuati "a vista" ed in particolare sono state eseguite riprese a scale differenti in modo da avere un inquadramento dell'intera struttura architettonica con prese nadirali ed acquisire i paramenti murari con prese oblique.

Nonostante alcuni elementi di disturbo (alberi, turisti e pali dell'energia elettrica), è stato possibile acquisire in sicurezza l'intera struttura. Durante le attività di sorvolo il drone è stato pilotato in condizioni di assoluta sicurezza. Al termine di ciascun volo, i *datasets* fotografici acquisiti sono stati sottoposti ad una selezione finalizzata ad ottimizzare le caratteristiche di sovrapposizione e messa a fuoco.

Successivamente, il processamento è stato effettuato utilizzando il *software* Agisoft Photoscan che ha permesso di realizzare l'allineamento delle immagini, la nuvola di punti, la *mesh*, la *texture* ad alta risoluzione e, infine, il modello 3D, le ortofoto ed i temi vettoriali.



Fig. 6: Immagini acquisite da drone nell'area del *Baluarte de Santo Domingo*



Fig. 7: Modello texturizzato dell'area tra il *Baluarte de Santo Domingo* e il *Baluarte de la Cruz*



### **Risultati e sviluppi futuri**

Al rientro in Italia è stata avviata la fase di elaborazione di tutti i *dataset* fotografici acquisiti. L'elaborazione ancora in corso ha già messo in evidenza risultati promettenti.

La tecnica di tipo speditivo mostrata si configura come un valido supporto per lo studio, la conoscenza e il monitoraggio di strutture monumentali di notevole complessità.

In prospettiva futura, si prevede di completare l'indagine sull'intera cinta muraria di Cartagena, di perfezionare la ricerca, di elaborare rapporti di ricerca e pubblicazioni da sottoporre al vaglio della comunità scientifica internazionale, di presentare i primi risultati a convegni nazionali ed internazionali e di trasferire l'approccio metodologico ad altri casi di studio.

Potenza, 06/08/2016

Firma del fruitore

Firma del proponente