

**MODELO DIGITAL EN 3D DEL TRAMO DE LAS MURALLAS DE CARTAGENA  
DE INDIAS, COMPRENDIDO ENTRE EL BALUARTE DE LA MERCED Y EL  
BALUARTE SANTO DOMINGO UTILIZANDO METODOLOGIA BIM PARA  
IDENTIFICAR Y ACTUALIZAR LAS PATOLOGÍAS EXISTENTES**

**ANDRÉS FELIPE MENDOZA AGAMEZ**

**JUAN GUILLERMO OCAMPO HENAO**



**Universidad  
de Cartagena**  
Fundada en 1827

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARTAGENA DE INDIAS, D T Y C. – BOLÍVAR**

**2020**

**MODELO DIGITAL EN 3D DEL TRAMO DE LAS MURALLAS DE CARTAGENA  
DE INDIAS, COMPRENDIDO ENTRE EL BALUARTE DE LA MERCED Y EL  
BALUARTE SANTO DOMINGO UTILIZANDO METODOLOGIA BIM PARA  
IDENTIFICAR Y ACTUALIZAR LAS PATOLOGÍAS EXISTENTES**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN**

ESCONPAT.

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN**

GESTIÓN Y CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO

**DIRECTOR DE PROYECTO:**

PhD. JORGE ÁLVAREZ CARRASCAL

**AUTORES:**

ANDRÉS FELIPE MENDOZA AGAMEZ

JUAN GUILLERMO OCAMPO HENAO

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARTAGENA D.T Y C.**



## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN .....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>2</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>3</b>
<b>1. MARCO REFERENCIAL .....</b>	<b>6</b>
<b>1.1. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>6</b>
<b>1.2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>12</b>
1.2.1. Historia de Cartagena .....	12
1.2.2. Historia de las murallas de Cartagena .....	14
1.2.3. Descripciones del tramo de estudio .....	16
1.2.4. Metodología BIM .....	17
1.2.5. BIM para edificios del patrimonio cultural .....	19
1.2.6. Autodesk Revit .....	21
1.2.7. Registro de datos térmicos.....	21
<b>1.3. ANTECEDENTES .....</b>	<b>22</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>27</b>
<b>2.1. OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>27</b>
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>28</b>
<b>3.1. PRIMERA FASE: RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE..</b>	<b>29</b>
3.1.1. Composición geométrica .....	30
3.1.2. Contexto histórico .....	31
3.1.3. Información de los materiales.....	33
<b>3.2. SEGUNDA FASE: RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN PRIMARIA ....</b>	<b>34</b>
<b>3.3. RESUMEN DEL REGISTRO PATOLÓGICO.....</b>	<b>59</b>
<b>3.4. TERCERA FASE: REALIZACIÓN DEL MODELO EN 3D.....</b>	<b>61</b>
<b>3.5. RESULTADOS.....</b>	<b>65</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>81</b>



<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>83</b>
---------------------------	-----------

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. REGISTRO BALUARTE LA MERCED.....	16
FIGURA 2. REGISTRO DEL BALUARTE DE SANTO DOMINGO.....	17
FIGURA 3. DIMENSIONES DE LA TECNOLOGÍA BIM.....	20
FIGURA 4. ESQUEMA METODOLÓGICO PROPUESTO. FUENTE: LOS AUTORES.....	28
FIGURA 5. DETALLE DE LA CORTINA ENTRE BALUARTE DE SANTIAGO Y SANTO DOMINGO...	31
FIGURA 6. FRENTE DE PLAZA DE BALUARTE DE SAN FELIPE O DE SANTO DOMINGO, CON SANTIAGO Y LA CRUZ, 1617.....	32
FIGURA 7. DETALLE BALUARTE SANTA CRUZ, BALLESTAS Y LA MERCED.....	33
FIGURA 8. DELIMITACIÓN TRAMO DE ESTUDIO. TOMADO Y MODIFICADO DE GOOGLE EARTH, 2020.....	34
FIGURA 9. SECUENCIA DE FOTOGRAFÍAS TOMADAS CON DRONE. SECTOR BALUARTE SANTO DOMINGO. FUENTE: AUTORES.....	35
FIGURA 10. SECUENCIA DE FOTOGRAFÍAS TOMADAS CON DRONE. SECTOR BALUARTE SANTO DOMINGO. FUENTE: AUTORES.....	36
FIGURA 11. PARTE DE LA SECUENCIA DE FOTOGRAFÍAS DE LA ESCARPA DEL TRAMO EN ESTUDIO. FUENTE: AUTORES.....	37
FIGURA 12. PARTE DE LA SECUENCIA DE FOTOGRAFÍAS DE LA CONTRAESCARPA DEL TRAMO EN ESTUDIO. FUENTE: AUTORES.....	37
FIGURA 13. ESTADO ACTUAL PARTE ALTA DEL BALUARTE DE SANTO DOMINGO. FUENTE: AUTORES.....	39
FIGURA 14. ESTADO GENERAL DE ALGUNOS ELEMENTOS DE LA PARTE ALTA DEL BALUARTE DE SANTO DOMINGO. FUENTE: AUTORES.....	40
FIGURA 15. IDENTIFICACIÓN DE BASURA Y VEGETACIÓN EN ALGUNOS ELEMENTOS EN LA PARTE ALTA DEL BALUARTE DE SANTO DOMINGO. FUENTE: AUTORES.....	41



FIGURA 16. ESTADO GENERAL DE LA ESCARPA EN EL TRAMO DE MURALLA QUE CORRESPONDE AL BALUARTE DE SANTO DOMINGO. FUENTE: AUTORES.....	42
FIGURA 17. ESTADO GENERAL EN LA ZONA DE LA RAMPA DE ACCESO AL BALUARTE DE SANTO DOMINGO. FUENTE: AUTORES.....	43
FIGURA 18. ALGUNOS REGISTROS DE JUNTAS ENTRE ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN LA RAMPA DE ACCESO AL BALUARTE SANTO DOMINGO. FUENTE: AUTORES. ....	44
FIGURA 19. IDENTIFICACIÓN GENERAL DEL ESTADO DE ALGUNOS ELEMENTOS E INTERVENCIONES EN LA CONTRAESCARPA DEL TRAMO DE MURALLA DEL BALUARTE SANTO DOMINGO. FUENTE: AUTORES. ....	44
FIGURA 20. ALGUNOS ELEMENTOS Y ESTADO GENERAL DE LA CONTRAESCARPA DE UN TRAMO DE MURALLA ALEDAÑO AL BALUARTE DE SANTO DOMINGO. FUENTE: AUTORES. ....	45
FIGURA 21. ALGUNOS ELEMENTOS Y ESTADO GENERAL DE LA CONTRAESCARPA DE UN TRAMO DE MURALLA ALEDAÑO AL BALUARTE DE SANTO DOMINGO. FUENTE: AUTORES. ....	46
FIGURA 22. PLACA Y VISTA GENERAL DE LA ESCARPA DE MURALLA EN UN TRAMO ALEDAÑO AL BALUARTE SANTO DOMINGO. FUENTE: AUTORES.....	47
FIGURA 23. VISTA GENERAL DEL ESTADO EN LA PARTE SUPERIOR DEL TRAMO DE MURALLA ALEDAÑO AL BALUARTE DE SANTO DOMINGO. FUENTE: AUTORES.....	47
FIGURA 24. VISTA GENERAL DEL ESTADO EN LA PARTE SUPERIOR DEL TRAMO DE MURALLA ENTRE EL BALUARTE SANTO DOMINGO Y EL BALUARTE LA SANTA CRUZ. FUENTE: AUTORES. ....	48
FIGURA 25. VISTA GENERAL DEL ESTADO EN CONTRAESCARPA DEL TRAMO DE MURALLA ENTRE EL BALUARTE SANTO DOMINGO Y EL BALUARTE LA SANTA CRUZ. FUENTE: AUTORES. ....	49
FIGURA 26. VISTA GENERAL DEL ESTADO EN LA ESCARPA DEL TRAMO DE MURALLA ENTRE EL BALUARTE SANTO DOMINGO Y EL BALUARTE LA SANTA CRUZ. FUENTE: AUTORES....	49
FIGURA 27. VISTA GENERAL DEL ESTADO EN LA ESCARPA DEL TRAMO DE MURALLA ENTRE EL BALUARTE SANTO DOMINGO Y EL BALUARTE LA SANTA CRUZ. FUENTE: AUTORES....	50
FIGURA 28. IDENTIFICACIÓN DEL BALUARTE LA SANTA CRUZ. ....	51
FIGURA 29. VISTA Y ESTADO GENERAL EN LA PARTE SUPERIOR DEL BALUARTE LA SANTA CRUZ. FUENTE: AUTORES.....	51



FIGURA 30. VISTA Y ESTADO GENERAL DE LA CONTRAESCARPA EN EL TRAMO DE MURALLA DEL BALUARTE LA SANTA CRUZ. FUENTE: AUTORES. ....	52
FIGURA 31. VISTA GENERAL Y ESTADO DE ALGUNOS ELEMENTOS EN EL TRAMO DE MURALLA ALEDAÑO AL BALUARTE LA SANTA CRUZ. FUENTE: AUTORES. ....	53
FIGURA 32. VISTA Y ESTADO GENERAL DE LA ESCARPA EN TRAMO ALEDAÑO AL BALUARTE LA SANTA CRUZ. FUENTE: AUTORES. ....	54
FIGURA 33. VISTA Y ESTADO GENERAL DE UN TRAMO ALEDAÑO AL BALUARTE LA SANTA CRUZ Y DONDE SE IDENTIFICA LA PLATAFORMA DE LAS BALLESTAS. FUENTE: AUTORES. ....	55
FIGURA 34. IDENTIFICACIÓN Y ESTADO GENERAL DE LA ESCARPA EN EL TRAMO DE MURALLA ALEDAÑO AL BALUARTE LA SANTA CRUZ, DONDE SE IDENTIFICA LA PLATAFORMA DE BALLESTAS. FUENTE: AUTORES. ....	56
FIGURA 35. VISTA Y ESTADO GENERAL DE LA CONTRAESCARPA EN UN TRAMO ENTRE LA PLATAFORMA DE BALLESTAS Y EL BALUARTE LA MERCED. FUENTE: AUTORES. ....	57
FIGURA 36. VISTA GENERAL E IDENTIFICACIÓN DE ALGUNOS ELEMENTOS DE LA ESCARPA DEL TRAMO DE MURALLA ENTRE LA PLATAFORMA DE BALLESTAS Y EL BALUARTE LA MERCED. ....	58
FIGURA 37. IDENTIFICACIÓN DEL BALUARTE LA MERCED. FUENTE: AUTORES. ....	58
FIGURA 38. IDENTIFICACIÓN ESCARPA (ROJO) Y CONTRAESCARPA (NARANJA) DEL TRAMO DE ESTUDIO. TOMADO Y MODIFICADO DE GOOGLE EARTH 2020. ....	59
FIGURA 39. PUNTOS DE CONTROL REFERENCIADOS PARA IDENTIFICACIÓN DE PATOLOGÍAS. TOMADO Y MODIFICADO DE GOOGLE EARTH 2020. ....	59
FIGURA 40. CARGA DE FOTOS AL PROGRAMA AGISOFT PARA GENERACIÓN DE IMAGEN 3D. FUENTE: AUTORES. ....	62
FIGURA 41. ORGANIZACIÓN SECUENCIAL DE LAS IMÁGENES EN AGISOFT. FUENTE: AUTORES. ....	62
FIGURA 42. RESULTADOS DE GENERACIÓN DE IMAGEN 3D A TRAVÉS DE AGISOFT, BASE PARA LA GENERACIÓN DEL MODELO. FUENTE: AUTORES. ....	63
FIGURA 43. OBTENCIÓN DE NUBE DE PUNTOS EN AGISOFT DE UN TRAMO DE LA ESCARPA DEL BALUARTE DE SANTO DOMINGO. FUENTE: AUTORES. ....	64
FIGURA 44. DETALLE DE LA NUBE DE PUNTOS OBTENIDA DE AGISOFT PARA UN TRAMO DE LA ESCARPA DEL BALUARTE DE SANTO DOMINGO. FUENTE: AUTORES. ....	64



FIGURA 45. MODELO RESULTADO DEL MANEJO DE LA NUBE DE PUNTOS EN REVIT. FUENTE: AUTORES. ....	65
FIGURA 46. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 1 Y 2). FUENTE: AUTORES. ....	65
FIGURA 47. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 3). FUENTE: AUTORES. ....	66
FIGURA 48. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 4). FUENTE: AUTORES. ....	66
FIGURA 49. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 5, 6 Y 7). FUENTE: AUTORES. ....	67
FIGURA 50. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 8 Y 9). FUENTE: AUTORES. ....	67
FIGURA 51. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 10). FUENTE: AUTORES. ....	68
FIGURA 52. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 11). FUENTE: AUTORES. ....	68
FIGURA 53. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 12). FUENTE: AUTORES. ....	69
FIGURA 54. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 13). FUENTE: AUTORES. ....	69
FIGURA 55. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 14). FUENTE: AUTORES. ....	70
FIGURA 56. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 15). FUENTE: AUTORES. ....	70
FIGURA 57. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 16). FUENTE: AUTORES. ....	71
FIGURA 58. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 17). FUENTE: AUTORES. ....	71
FIGURA 59. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 18). FUENTE: AUTORES. ....	72



FIGURA 60. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 19). FUENTE: AUTORES.....	72
FIGURA 61. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 20). FUENTE: AUTORES.....	73
FIGURA 62. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 25). FUENTE: AUTORES.....	73
FIGURA 63. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 26). FUENTE: AUTORES.....	74
FIGURA 64. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 27). FUENTE: AUTORES.....	74
FIGURA 65. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 28). FUENTE: AUTORES.....	75
FIGURA 66. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 29). FUENTE: AUTORES.....	75
FIGURA 67. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 30). FUENTE: AUTORES.....	76
FIGURA 68. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 31). FUENTE: AUTORES.....	76
FIGURA 69. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 32). FUENTE: AUTORES.....	77
FIGURA 70. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 33). FUENTE: AUTORES.....	77
FIGURA 71. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 34). FUENTE: AUTORES.....	78
FIGURA 72. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 35). FUENTE: AUTORES.....	78
FIGURA 73. UBICACIÓN DE PATOLOGÍA IDENTIFICADA Y UNIFICADA EN EL MODELO DE REVIT (PAT 36). FUENTE: AUTORES.....	79
FIGURA 74. DISTRIBUCIÓN POR GRUPO DE PATOLOGÍAS EN EL TRAMO. ....	79
FIGURA 75. DISTRIBUCIÓN ESPECÍFICA DE PATOLOGÍAS IDENTIFICADAS EN EL TRAMO. ....	80



## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. RESUMEN DEL PROCEDO METODOLÓGICO EJECUTADO. FUENTE: LOS AUTORES. ....	29
TABLA 2. RESUMEN DE ESQUEMAS DE CLASIFICACIÓN DE PATOLOGÍAS, DE ACUERDO A LA GUÍA ICOMOS.....	38
TABLA 3. RESUMEN PUNTOS DE CONTROL PARA EL REGISTRO PATOLÓGICO. FUENTE: LOS AUTORES.....	60



## RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue desarrollar digitalmente un modelo tridimensional de un tramo de la estructura de muralla en Cartagena, específicamente en el tramo comprendido entre el Baluarte de La Merced y el Baluarte de Santo Domingo, aplicando la metodología BIM para generar un modelo en software Revit que constituye visualmente una herramienta con la que se puede interactuar, que integra información de diagnóstico en cuanto a las patologías que se identificaron para dicho tramo.

Para el desarrollo del presente proyecto se ejecutó la clasificación e identificación de información disponible sobre los estudios realizados en el cordón amurallado de Cartagena a lo largo de la historia, para luego ubicar e identificar las patologías presentes en la estructura del tramo seleccionado, de acuerdo a los parámetros que establece la guía ICOMOS de las Naciones Unidas y así realizar el modelo digital de información del tramo en estudio.

Este estudio, pertenece a la línea de investigación Conservación del Patrimonio, del grupo de investigación Estructura, Construcción y Patrimonio ESCONPAT de la Universidad de Cartagena, y permitió concluir que los procesos patológicos más evidentes en el tramo estudiado tienen que ver con la pérdida de material, bien sea por erosión o por la alveolización. Así mismo, se identificó la colonización biológica a través de plantas y musgos y la decoloración y presencia de costras negras a lo largo del tramo estudiado.

Las patologías identificadas coinciden con las conclusiones de estudios realizados, entre ellos el PEMP del Cordón Amurallado y Castillo de San Felipe. La construcción de un modelo en el que se incluyen las patologías del tramo resulta como una herramienta de monitoreo estructural y de conservación, seguimiento que se ha recomendado para la protección del patrimonio.



## ABSTRACT

The objective of the present investigation was to develop a three-dimensional digital model of the walls of Cartagena, specifically in the section between the Bastion of La Merced and the Bastion of Santo Domingo, applying the BIM methodology to generate a Revit software model that constitutes a Interactive and visual tool that integrates diagnostic information regarding the pathologies that were identified for said section.

For the development of this project, the classification and identification of available information on the studies carried out in the walled cordon of Cartagena throughout history was carried out, to then locate and identify the pathologies present in the structure of the selected section, according to the parameters established by the United Nations ICOMOS guide and thus carry out the digital information model of the section under study.

This study belongs to the Heritage Conservation research line, from the ESCONPAT Structure, Construction and Heritage research group of the University of Cartagena, and allowed us to conclude that the most evident pathological processes in the section studied have to do with the loss of material, either by erosion or by alveolization. Likewise, the biological colonization through plants and mosses and the discoloration and presence of black crusts were identified throughout the section studied.

The pathologies identified coincide with the conclusions of studies carried out, including the PEMP of the Walled Cord and Castillo de San Felipe. The construction of a model in which the pathologies of the section are included results as a tool for structural monitoring and conservation, a follow-up that has been recommended for the protection of heritage.



## INTRODUCCIÓN

El concepto de patrimonio cultural es ampliamente aceptado como producto y proceso que ofrece a cada sociedad una herencia de recursos que las generaciones se transmiten buscando un beneficio.

A través de la promoción del acceso a la diversidad cultural y al mismo disfrute del patrimonio cultural se encierra el potencial del mismo, ampliado con el propósito de enriquecer el capital social, el cual desarrolla un sentido de pertenencia que individual y colectivamente ayudan a mantener la cohesión social y territorial. Por otra parte, el patrimonio cultural ha adquirido una gran importancia económica para el sector del turismo en muchos países, al mismo tiempo que se generaban nuevos retos para su conservación (UNESCO, 2019).

Precisamente, el título de ser una de las ciudades amuralladas más conservadas del mundo se debe en parte a que la muralla de Cartagena de Indias es la fortificación más completa de América del Sur, declarada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO, y además es uno de los principales atractivos turístico que presenta esta ciudad. En los últimos años estos vestigios de la era colonial están siendo afectados por diversos factores que, tanto directa como indirectamente están atacando y deteriorando su integridad estructural, causando que se presente la posibilidad de que estos íconos que representan cientos de años de historia de la ciudad de Cartagena puedan desaparecer (UNESCO, 2019).

Dentro de ese marco, estos conjuntos de fortificaciones han sido objeto de diversas investigaciones y proyectos de intervención, realizados por diferentes entidades y grupos de profesionales comprometidos con la protección y conservación de este patrimonio, sin embargo, al momento de iniciar un nuevo proyecto de investigación encaminado a la preservación de estas, no se encuentra un lugar o una base central de datos que suministre toda la información necesaria de manera agrupada y organizada.

La Escuela Talleres (ETCAR) y el Ministerio de Cultura, entidades encargadas de la protección de las fortificaciones de Cartagena no cuentan con una herramienta interactiva digital que cumpla las funciones de un modelo de información central, donde las entidades



encargadas de la conservación tengan la disponibilidad de cargar y descargar información de manera actualizada.

Para lograr la integración de forma visual de toda la información disponible de un bien cultural como lo son las murallas de la ciudad de Cartagena, se podría utilizar la metodología Building Information Modeling (BIM), la cual enmarca el uso de las herramientas destinadas a crear un sistema de información digital de un proyecto asociado a su documentación gráfica, siendo ésta generalmente un modelo tridimensional del mismo. El objetivo de la metodología BIM es potenciar el empleo de un modelo de información unificado y completo del edificio sobre el que desarrollar los distintos procedimientos de trabajo de un modo coordinado, sistemático y eficiente (buildingSMART, 2018).

Gracias a la implementación de la metodología BIM, se creará una maqueta virtual, haciendo que todo proyecto de restauración, estrategias de conservación preventiva, gestión y divulgación, puedan convertirse en un modelo digital.

En torno a la ausencia de una herramienta interactiva digital capaz de integrar toda la información concerniente al cordón amurallado, el presente trabajo permitió desarrollar un modelo digital 3D, específicamente en el tramo comprendido entre el baluarte La Merced y el Baluarte Santo Domingo, que contribuye a la identificación y actualización las patologías existentes, con lo cual se tiene una base de datos relacionada con la posible restauración del mismo.

El continuo uso de la tecnología y en específico de la reconstrucción a través de programas de computador que tiene como propósito el levantamiento de información de edificaciones existentes, ha alentado el desarrollo de estudios como el de Berrío y Monterrosa en 2019, para el tramo comprendido entre el Baluarte San Pedro Mártir hasta el Baluarte de Santa Clara, el cual tuvo como objetivo elaborar un modelo 3D aplicando la metodología BIM mediante el software Revit, con un alcance similar al presente trabajo.

Específicamente para el tramo de estudio la referencia patológica desarrollada corresponde al informe del PEMP de 2018, en el cual se indican la presencia de alveolización general en toda la superficie de la escarpa y contraescarpa, así como que la contraescarpa y la escarpa presenta un gran porcentaje de costras, manchas negras, verdes y blancas en el pañete, producidas por factores ambientales para el tramo de estudio.



Introducido el tema a tratar y el planteamiento del presente trabajo, la estructura de este consta de seis apartados. El primero de ellos introduce la descripción del proyecto de investigación, definiendo en el segundo el estado del arte del tema de investigación, describiendo la evolución histórica del patrimonio cultural, las murallas de Cartagena, su importancia en aquel entonces y la importancia cultural que desprende en la actualidad, también en este mismo apartado se describe la importancia que genera el uso de la metodología BIM en materia de restauración arquitectónica, obteniendo un modelo fiel a la realidad. Acto seguido se hace la justificación del proyecto investigativo incluyendo las razones por las cuales se hace necesario la investigación y las ventajas de su implementación.

En el cuarto de ellos se introduce los objetivos del documento, definiendo de forma seguida los objetivos específicos. En el quinto apartado se definen los límites o alcance del mismo. En el último apartado, el sexto, se aplica el método propiamente dicho al proyecto.

Por motivos de la viabilidad del proyecto se limitó el estudio de las patologías y la elaboración del modelo digital al tramo de muralla comprendido entre el baluarte de La Merced y el baluarte de Santo Domingo.

El desarrollo constante de las actualizaciones de esta clase de trabajos podría usarse perfectamente como herramienta de monitoreo de la evolución patológica que viene presentando la estructura de muralla en el tramo, de tal manera que se verifican los puntos que han sido afectados con anterioridad y que se han documentado previamente, además de que se prevé la evolución de los mismos.

Este estudio, pertenece a la línea de investigación Conservación del Patrimonio, del grupo de investigación Estructura, Construcción y Patrimonio ESCONPAT de la Universidad de Cartagena, y constituirá una fuente de consulta para futuras investigaciones sobre conservación de las murallas, identificándolo además como un proyecto de aplicación al desarrollo de intervenciones en un bien patrimonial, la gestión del mismo promoviendo la aplicación de la metodología BIM como aspecto novedoso y necesario.



## 1. MARCO REFERENCIAL

### 1.1. ESTADO DEL ARTE

Las técnicas y metodologías utilizadas en el proceso de construcción han ido evolucionando con el transcurrir del tiempo, es por ello por lo que en la actualidad la metodología BIM está siendo utilizada con más frecuencia por las empresas constructoras, ya que ofrecen una integración en las diferentes etapas del desarrollo de un proyecto de construcción; razón por la cual se hizo necesario realizar una revisión bibliográfica sobre trabajos investigativos que involucren el manejo de la metodología BIM, seleccionando las investigaciones que se han realizado a estructuras arquitectónicas de tipo patrimoniales, y que se comentan a continuación.

“MODELADO BIM DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO PARA LA INTERVENCIÓN: EL TEATRO ROMANO DE SAGUNTO, (Martínez Villa, 2018)”.

Este trabajo de grado fue realizado en Valencia, España, con el objetivo de estudiar la metodología BIM específicamente con un enfoque hacia la restauración arquitectónica, en este proyecto se buscó obtener un modelado fiel a la realidad, el cual una vez realizado permita la intervención del Teatro Romano Sagunto, además de esto se expone el desarrollo de dichas herramientas, sus ventajas y se comparan respecto de las metodologías empleadas hasta la fecha.

El Teatro Romano Sagunto fue construido en la época romana alrededor del año 50 D.C. en la ladera norte de la ciudad de Sagunto (Valencia, España). Desde sus inicios, y como es de esperarse para el teatro siempre hay intervenciones que pese a procurar su restauración, en caso de no hacerse adecuadamente, pueden deteriorar la construcción hasta el punto de no poder distinguir la original.

Realizar proyectos de rehabilitación e intervención del patrimonio sumado al desarrollo de la metodología BIM ha supuesto un gran avance que permite obtener ventajas en cuanto a fiabilidad y autenticidad del modelo con respecto a la realidad, recolectando datos por ejemplo a través de la nube de puntos.



Siendo el programa Revit de Autodesk es uno de los principales softwares que trabajan con BIM, éste fue definitivo para el desarrollo del modelo 3D y evaluar la situación del edificio para su posterior intervención.

El trabajo de investigación realizado con puntos de vista tanto prácticos como teóricos para relacionar las metodologías del Building Information Modelling y el desarrollo de proyectos para intervenir en el patrimonio, concluye acertadamente sobre las mejoras hacia el sector dedicado a la construcción y a la rehabilitación, esto teniendo en cuenta los eficientes resultados que evidencian intervenciones estudiadas (Martínez Villa, 2018).

Es un hecho, que la introducción de la metodología BIM en los estudios de arquitectura e ingeniería, mejoraron el sistema de trabajo, especialmente los procesos de gestión, coordinación y previsión, que podrían presentarse anteriormente por falta de comunicación. Precisamente el hecho de que se pueda trabajar un único modelo, el cual reúne la información para solventar dificultades en la coordinación, logra que los distintos departamentos del proyecto trabajen armoniosamente en la intervención en las estructuras (Martínez Villa, 2018).

En el caso de los múltiples proyectos de investigación e intervenciones realizadas a las murallas de Cartagena y a todo el patrimonio arquitectónico de la ciudad de manera independiente e incomunicada, se ve la posibilidad de que si estos agentes contaran en todo momento con la posibilidad de cargar y descargar datos de un modelo central actualizado, se reducirían considerablemente los fallos de coordinación en los proyectos y este trabajo de grado enfocado a una intervención del Teatro Romano de Sagunto sirve como referencia para afirmar esto (Lara Ortega, 1991).

“SEGMENTACIÓN DE MALLAS 3D DE EDIFICIOS HISTÓRICOS PARA LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO, (Herráez Concejo & Vendrell Vidal, 2018)”.

En este artículo se propone un método de segmentación de mallas 3D enfocado a la representación de edificios históricos. Estos tipos de edificios se caracterizan por tener singularidades y elementos característicos en las fachadas, tales como puertas o ventanas. El



objetivo principal consiste en reconocer estas características en los edificios, entendiéndose como tales aquellas partes del modelo que difieren de la estructura principal del mismo.

Para cumplir con ello se utiliza un algoritmo de reconocimiento de caras planas que permita crear un grafo que muestre la conectividad entre ellas, reflejando así la forma del modelo tridimensional. Posteriormente el grafo se compara con otros predefinidos que conforman los patrones a buscar, lo cual permite indicar coincidencia entre ambos y la ubicación de las características buscadas.

Los resultados obtenidos en esta investigación arrojan que el método desarrollado ha resultado ser eficaz para la detección de características y adecuado para su inclusión en aplicaciones de levantamiento arquitectónico (Herráez Concejo & Vendrell Vidal, 2018).

Se realizaron una serie de pruebas sobre diferentes tipos de mallas 3D representando edificios modelados y edificios escaneados, en las que se ha comprobado la robustez de los algoritmos implementados y se han analizado sus costes temporales, estudiando los factores que más influían sobre estos.

El paso a paso propuesto resulta siendo efectivo para detectar características, determinar la relación de costos en el tiempo que implica aplicar la metodología, señalando que al ser suficientemente pequeños, esta resulta adecuada para su inclusión en las técnicas de levantamiento arquitectónico. Se señala además, las posibilidades de aplicar el algoritmo en otros contextos, como el caso de la restauración arqueología, donde el reconocimiento de caras planas y la definición de patrones pueden ayudar a la detección y reconstrucción de faltantes.

La línea de trabajo que parte de esa investigación tiene que ver con patrones de comparación más robustos, es decir, generara patrones más únicos, esto podría darse dotando de información adicional a los nodos del grafo, por lo que sería más fácil distinguir las diferentes características existentes.

**“UNA FORMA INTEGRADA DE DOCUMENTAR, ANALIZAR Y GESTIONAR EL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO: EL TODO Y LAS PARTES EN EL PALACIO DEL**



GENERALIFE, (Parrinello, Gómez-Blanco Pontes, Picchio, Rodríguez Moreno, & Rivas López, 2019)”.

Varios profesores e investigadores participaron en este proyecto multidisciplinario que, utilizando el Generalife como prueba, propuso una metodología teórica y práctica sobre el estudio de arquitectura digital, que ha permitido comparar los diferentes formatos de datos tridimensionales en términos de su capacidad para ser interpretados en el proceso de conservación y gestión del patrimonio arquitectónico. Las experiencias obtenidas en los diferentes procesos de la encuesta se completaron con un riguroso análisis histórico de la evolución formal y constructiva del Generalife, a partir de la cual ha sido posible realizar la evaluación crítica posterior (Parrinello, Gómez-Blanco Pontes, Picchio, Rodríguez Moreno, & Rivas López, 2019).

El exhaustivo levantamiento realizado del conjunto monumental permite abordar estudios temáticos más detallados de interés para su gestión, conservación e intervención (Puche et al., 2017; ReinosoGordo et al., 2018). En este caso los trabajos se completaron con una serie de análisis relacionados con las patologías constructivas y energéticas del edificio, así como con su comportamiento estructural (Picchio, 2017).

Después de recopilar toda la información se procedió a crear el modelo de gestión integral basado en la metodología BIM, este ha sido un proyecto que ha experimentado y puesto en valor los diálogos que es posible establecer entre los sistemas de información de la información arquitectónica (como BIM y GIS) y los sistemas de documentación remota de la arquitectura, intentando desarrollar, a través de la construcción de modelos 3D, bases de datos dinámicas donde el usuario pueda interactuar con un espacio virtual patrimonial como es el Generalife, donde pueda vivirlo e interrogarlo (Picchio, 2017).

“TÉCNICAS BIM APLICADAS A LA RECONSTRUCCIÓN VIRTUAL DEL YACIMIENTO ARQUEOLÓGICO MLEIHA-5, Juan José Haba Bartolomé. (2015)”.

El objetivo del trabajo de grado consistió en definir y describir de forma ordenada, clara y precisa el procedimiento a seguir en el desarrollo de un trabajo mediante técnicas BIM (Building Information Modeling - Modelado de Información de Construcción) con la



finalidad añadida de que pueda servir como un protocolo general para los profesionales relacionados con el ámbito de estas materias

Este proyecto de tesis de grado realizado en Madrid, España pretende evaluar el impacto de la metodología de trabajo BIM aplicado al yacimiento arqueológico Mleiha zona 5 situado en Emiratos Árabes Unidos. Dicho trabajo incluyó la elaboración de un modelo de reconstrucción virtual del cementerio y sus antiguos panteones. Para ello se utilizó topografía y cartografía de la zona, en una superficie aproximada de 1 Hectárea, procedente de un levantamiento a escala 1:200 realizado en Mayo de 2013.

El yacimiento a estudio se documenta bajo las siglas MLH5 que corresponde a las siglas de la localidad donde se encuentra Mleiha (MLH) y el número asignado dentro del área de excavación (5). La localización exacta de Mleiha es al Sureste del estado de Sharjah, entre las montañas de Faiyah y las montañas de Oman, donde las condiciones climatológicas son especiales, con un ambiente árido y seco característico de los Emiratos Árabes Unidos su importancia arqueología es de gran relevancia para la cultura islamita, por tal motivo su preservación ha sido motivo de estudio para esta tesis de grado.

Utilizando Revit como herramienta de la metodología BIM se obtuvo un modelo tridimensional que determina para el yacimiento estudiado una representación gráfica, el cual busca que la coordinación entre las de diferentes disciplinas que intervienen en el proyecto pueda detectar errores en las etapas de ejecución y corregirlos en el transcurso de la investigación (Haba Bartolomé, 2015).

Al revisar las condiciones ambientales especiales en las que se encuentra el yacimiento arqueológico de Mleiha-5 y teniendo en cuenta los resultados satisfactorios obtenidos en este trabajo de grado, hace posible la consideración de la realización de una modelación similar aplicado al cordón amurallado de Cartagena, el cual podría servir como fuente de información para futuras investigaciones.

“BIM EN LA CATEDRAL DE PALMA DE MALLORCA, (Control BIM S.L y Gea Asesría, 2017)”.



La Catedral de Palma de Mallorca es un templo de estilo gótico construido a la orilla de la bahía de Palma en Mallorca, España, el cual está conformado por tres capillas, entre estas la capilla del Sagrado Corazón que es la protagonista en este proyecto de investigación.

Este es un proyecto que buscaba principalmente realizar una intervención aislada pero de manera directa, tanto sobre la arquitectura de la Capilla del Sagrado Corazón como sobre el retablo y patrimonio mueble de su interior incorporando documentación patológica y de intervención que permitiera generar un plan de mantenimiento correctivo y preventivo.

Para el desarrollo del proyecto se optó por utilizar la metodología considerando sus facilidades en cuanto al trabajo en un archivo único que almacena tanto el modelo como datos, lo cuales se pueden alimentar con información existente del proyecto hasta la fecha, así como la que se obtendrá en los diferentes trabajos posteriores. Esto hace posible generar consultas vinculadas al modelo y a los datos con acceso, según el nivel de intervención y permisos otorgados por los gremios, con el fin de gestionar y planificar la difusión de las intervenciones en un proyecto a 4 años.

Explorar el modelo de la maqueta virtual que se construye aplicando la metodología BIM es posible para los investigadores, quienes pueden crear secciones virtuales, hacer consultas gráficas, aplicar filtros de visualización, buscar información, etc. Esto, aplicado a la investigación y seguimiento del estado de las estructuras en estudio permite la localización de humedades al practicar una sección a la altura de las gárgolas, además, permite recolectar la información derivada de fases de estudios previos a fin de poder ser utilizada posteriormente tanto en la preparación del proyecto de restauración como en proyectos expositivos. Visualizar tridimensionalmente los elementos al largo plazo permite asociar la alteración de su estado, generalmente su deterioro, con mecanismos para su conservación.

Entre los resultados obtenidos por este proyecto de investigación se pueden destacar la disposición de tanta información fácil de consultar en un solo archivo gráfico lo que acelera el proceso de toma de decisiones y por lo tanto reduce costes indirectos en la realización de un proceso de intervención y finalizadas las labores de conservación/restauración, se ha dejado diseñado un plan de mantenimiento que ha de estar recogido dentro del proyecto de restauración (Control BIM S.L y Gea Asesría, 2017).



Teniendo en cuenta estos resultados y la similitud de las condiciones ambientales en donde está situada la Catedral de Palma con las condiciones salinas y húmedas en las que se encuentra Cartagena, es imprescindible tomar en cuenta el trabajo investigativo realizado en esta catedral como referencia para el presente proyecto de las murallas, puesto que pretende obtener resultados similares.

Entre los estudios desarrollados sobre la muralla es importante destacar el desarrollado por el Ingeniero Jorge Álvarez PhD, cuyo análisis incluyó la identificación de todos los elementos que componen la estructura del cordón amurallado de la ciudad de Cartagena, utilizando para ello una revisión documental histórica, otra exploratoria de campo y una parte de investigación experimental, contemplando el estudio de los materiales utilizados en su mantenimiento y restauración desde la óptica de sus propiedades físicas y petrográficas, realizando una confrontación de estas propiedades con los materiales originales que constituyen el cordón amurallado y con los materiales extraídos de las fuentes históricas de suministro. Dicho análisis, en el ámbito temporal y territorial del cordón amurallado identificó las amenazas a las cuales está sometido y sus posibles afectaciones hacia el futuro, así como también los riesgos antrópicos por el uso temporal o permanente de algunos espacios de las murallas, así como la formulación de algunos aspectos fundamentales para su manejo y protección partiendo de su participación como asesor del Ministerio de Cultura de Colombia y la Escuela Taller Cartagena de Indias en la elaboración del plan de manejo y protección del cordón amurallado y el Castillo San Felipe de Barajas (Álvarez, 2019).

## **1.2. MARCO TEÓRICO**

### **1.2.1. Historia de Cartagena**

El primer plano conocido data de 1570 el cual lo constituye un ingenio dibujo a mano alzada que al primer golpe de vista impacta por las preciosas naos surtas en la bahía. Y está bien que así sea porque para entonces Cartagena se había consolidado como terminal de los galeones de Tierra Firme. En efecto, a partir de mediados del siglo XVI, la corona española decide organizar el comercio de América alrededor de monopolios que contribuyan a su defensa. El propósito es proteger el intercambio indiano de los corsarios y piratas franco-ingleses que lo interfieren en aguas del Caribe y en las aproximaciones a la Península (ver "Piratas en América", Credencial Historia N° 89, mayo 1997). En virtud de las bondades de su rada y su



cercanía al vital istmo de Panamá, Cartagena funge como uno de los cinco grandes puertos del monopolio. Una vez al año, un enorme convoy mercante protegido por naves de guerra-galeones-levaba anclas en Sevilla con destino a Cartagena, a donde acudían tratantes de todo el Nuevo Reino de Granada y de Quito. Era la única ocasión de comercio legal; por fuera del sistema, todo era contrabando. Pero había más. Una vez se recibían noticias sobre la llegada de los acaudalados comerciantes peruanos a Panamá con la plata del Potosí, el convoy se desplazaba a Nombre de Dios en el Istmo, donde tenía lugar una fabulosa feria. Terminada ésta, la conserva regresaba a Cartagena a depositar el metálico. Y mientras la flota de los galeones de Tierra Firme zarpaba hacia La Habana, la plata esperaba la llegada de la poderosa Armada de la Guardia de la Carrera de Indias, encargada de transportar el precioso cargo hasta España y de imponer respeto en aguas que la Corona consideraba propias. Dueña de semejantes privilegios, Cartagena no podía sino prosperar aceleradamente (Segovia Salas, 2019).

Parte de la historiografía de Cartagena se centró en la narración, a veces novelada de los múltiples ataques de la ciudad durante los siglos XVI Y XVII: estos ataques sucesivos dieron lugar a la instauración progresiva de un sistema defensivo hecho murallas y de fuertes acabados en la segunda mitad del siglo XVIII. Cartagena se convierte así en la plaza fuerte colonial más importante de Sudamérica, la segunda en el caribe después de la Habana. Pero el tiempo republicano significara el inicio de un largo periodo de decadencia. Así, después de haber sido durante la época colonial, una ciudad comercial y militar de primer plano y también un lugar central de la trata de los esclavos, Cartagena se convierte, a lo largo del siglo XIX en una ciudad provincial, completamente marginalizada política, económica y culturalmente en un país más orientado hacia el espacio andino que hacia el caribe.

Situación que precisamente se logró evitar para el centro histórico de Cartagena y para las murallas que lo rodean, quienes pese al dinamismo de la de la ciudad, lograron su permanencia, descartando cualquier iniciativa destinada a erradicarlas a nombre de la modernización como ocurrió en varias partes del mundo: la marginalización de Cartagena permitió así la conservación de un conjunto de murallas únicas en América Latina (Cunin & Rinaudo, 2019).



El 11 de noviembre de 1811 se firmaría el Acta de Independencia Absoluta de España, comenzando con esto 10 largos años para lograr la emancipación definitiva. De los muchos bloqueos y sitios que sufrió la Villa de Heredia, cabe destacar el impuesto por Pablo Morillo, El Pacificador, en 1815, quien tenía el objetivo de recuperar esta importante plaza para la Corona Española. "Cartagena de Indias, Ciudad Heroica", fue el título que se ganaría luego de soportar más de tres meses de intenso cerco.

En la época republicana la ciudad entraría en un largo período de estancamiento, producto de su pérdida de interés estratégico y comercial. Se puede citar a Rafael Núñez, cartagenero que durante esta época de "recesión" de Cartagena de Indias, fuera elegido presidente de la República en cuatro ocasiones, dirigiendo los destinos de la Nación desde la Heroica, como en la Colonia lo hicieran algunos virreyes.

El renacer de Cartagena de Indias como ciudad determinante en Colombia se da entrado el Siglo XX con la reactivación de su economía, cuando su historia y sus leyendas son sólo recuerdos del pasado glorioso de una ciudad turística que recibe el Siglo XXI llena de esperanzas y sueños para el futuro. (Cartagena, 2015).

### **1.2.2. Historia de las murallas de Cartagena**

La construcción de las murallas iniciaron en el año de 1586 , y durante el periodo virreinal hasta el siglo XVIII, con la intención de brindar protección a sus habitantes ya que era blanco de constantes ataques por invasores que pretendían adueñarse de esta por su importancia geográfica a la hora de comercializar; esto se convirtió en el objeto de unión entre todas las personas de diferentes clase social de la época porque el temor de una futura invasión era mayor a las diferencia que tuvieran.

En 1811 Cartagena de Indias se convirtió en protectora del proceso de independencia y emancipación del yugo español hasta el segundo periodo español en 1815, fase que culminó con la segunda independencia definitiva de la nueva granada en los años 1821 a 1823 (Cabrera Cruz, 2017).

En el transcurrir del tiempo se le han realizado diferentes intervenciones al sistema amurallado de Cartagena, todas estas basadas en diferentes motivos, ya sea para la expansión espacial, el supuesto embellecimiento de la ciudad, bajo los pretextos de progreso o por higiene, por lo cual las demuelen, reconstruyen y transforman.



Uno de los primeros revellines demolidos fue el ubicado en el cabrero en el año de 1887 llamado de igual manera, que se encontraba ubicado frente a los baluartes de San Lucas y Santa Catalina. El derrumbe de este revellín se realizó con el fin de recuperar el espacio y permitir la ocupación en aquella zona de importantes personajes, entre ellos Rafael Núñez presidente de aquella época.

Los problemas de movilidad a las afueras de la ciudad específicamente en el barrio Getsemaní seguían persistiendo, el derribo de la puerta de la media luna, conocida como San Antonio, junto con los medios baluarte Santa Teresa y Santa Bárbara, se tomó como medida desesperada para solucionar este problema.

En 1905 se demuelen los baluartes de Barahona y Santa Isabel y en 1911 tuvo lugar el derribo de los baluartes de San Javier y San Ignacio, ubicados frente a la laguna del limbo en la entrada de Bocagrande, el derribo de estos baluartes se debió a dos motivos: " ensanchar el patio del cuartel, y construir un monumento a la bandera en la forma de obelisco de 30 metros de altura que se levantara sobre el baluarte de San Ignacio".

Para los inicios del siglo XX se tenía previsto el derribo de las murallas de la matuna con carácter del festejo del centenario del fusilamiento de Los Mártires en el año de 1916, estas iniciaron con el derribo de los emblemáticos baluartes de San Pedro Apóstol, San Andrés, San Pablo y parte de San Pedro Mártir.

Para 1920 las demoliciones continuaron. En el tramo de las murallas de pedro apóstol y San pablo lo que también era conocido la plaza de la carnicería, solo quedaban pocos paredones junto con el baluarte de San Pedro Mártir, cuyas demoliciones ya habían iniciado. En 1922 se derrumba la muralla entre el puente del Boquete y San pedro Mártir. En 1924 el lienzo de las murallas de la Matuna había desaparecido, pero el baluarte de San pedro Mártir no corrió con la misma suerte (Monroy Díaz, 2014).

Como lo indicó Flavio Romero, presidente de la Sociedad Colombiana de Arquitectos para 2014, "en Europa se tumbaron las murallas en París, Londres, en el sur de España, incluso cerca a nuestro territorio como La Habana, Lima y Veracruz. En Cartagena no se pudo hacer, honestamente por falta de plata". Ya una firma inglesa estaba encargada de hacerlo, pero los recursos sólo alcanzaron a derribar los rebellines de El Cabrero y la Media Luna,



posteriormente se tumbó el tramo de la hoy Calle del Arsenal, la Matuna, el convento San Juan de Dios, y la del monumento a la India Catalina (Caracol Radio, 2014).

La Lista del Patrimonio Mundial incluye en la actualidad un total de 1.073 sitios, compuestos por 832 culturales, 206 naturales y 35 mixtos que se distribuyen en 16 lugares alrededor del mundo (UNESCO, 2019). Es a través de la Convención de 1972 para la Protección del Patrimonio Mundial Cultural y Natural como se establece que ciertos lugares de la Tierra tienen un “valor universal excepcional” y se convierten en patrimonio común de la humanidad. Actualmente, 190 países han ratificado la Convención del Patrimonio Mundial, constituyendo una comunidad internacional unida en la misión conjunta de identificar y proteger el patrimonio natural y cultural más importante de nuestro planeta.

### 1.2.3. Descripciones del tramo de estudio

De acuerdo al diagnóstico resultado del desarrollo del PEMP entre las tipologías arquitectónicas actuales el Baluarte de La Merced clasifica como Intermedio Regular cuya construcción inicia en 1618, y cuyo estado de conservación se puede describir de manera general mencionando la presencia de erosión por alveolización en toda la superficie de los componentes en escarpa y contramuralla, la desestabilización de sillares, posiblemente por descensos en el terreno, como parte del componente inferior del baluarte está enterrado y el estado regular del solado con agrietamientos (Ministerio de Cultura, 2018).



**Figura 1. Registro Baluarte La Merced.**  
**Fuente: (Ministerio de Cultura, 2018)**

Por otro lado, el Baluarte de Santo Domingo es uno clasificado como de esquina regular que resalta entre otras cosas por constituirse como uno de los primeros tramos en iniciar construcción para el año de 1614. Los resultados del diagnóstico ejecutado para el PEMP indican evidencia de desplazamientos y desestabilización de sillares, ocasionados por pérdida de material, la presencia de alveolización general en toda la superficie de la escarpa y contraescarpa, así como que la contraescarpa y la escarpa presentan un gran porcentaje de costras, manchas negras, verdes y blancas en el pañete, producidas por factores ambientales.



Se evidencian alteraciones cromáticas, existencia de obstrucciones y mal direccionamiento de drenajes, estancamiento de aguas en refocete, entre otros (Ministerio de Cultura, 2018).



**Figura 2. Registro del Baluarte de Santo Domingo.**  
Fuente: (Ministerio de Cultura, 2018)

#### **1.2.4. Metodología BIM**

BIM es la sigla de Building Information Modeling, una metodología de trabajo colaborativa para la creación y gestión de un proyecto de construcción. El modelado BIM consiste en administrar información detallada de una edificación, incluyendo aspectos referentes tanto a su diseño como a su mantenimiento, con la finalidad de evitar la pérdida de recursos y administrar de forma más exacta el tiempo en la construcción de la estructura, o eludir costes innecesarios en futuras remodelaciones.

Con el modelado BIM se consigue una mejor gestión de datos durante el ciclo de vida de un edificio, empleando software dinámico de modelado de edificios en tres dimensiones y en tiempo real. Esta tecnología reúne con fidelidad la información de las construcciones de forma digitalizada, para su uso posterior en caso de reconstrucción o de mantenimiento (Idea Ingeniería, 2019).

##### **1.1.1.1. Modelo Centralizado**

El modelo centralizado se comporta como un contenedor de información virtual acerca de la construcción donde se vuelcan y actualizan los datos que los distintos agentes han ido desarrollando independientemente en sus propios modelos. En ese sentido cuando se genera nueva información sobre el modelo, esta siempre se incluye de tal manera que sea posible coordinar y contrastar su validez con el resto de información.



#### 1.1.1.2. Bidireccionalidad

Se trata de una cualidad que poseen todos aquellos softwares que trabajan en la metodología BIM. Al tratarse de aplicaciones en donde es sencillo extraer información de los modelos, la gestión y manipulación de las mismas repercute en el hecho de que manipula un modelo centralizado, coordinando y comprobando las relaciones que se establecen con la información ya existente.

El trabajo paralelo en distintas etapas del proceso que involucra el diseño y la construcción de un proyecto, precisamente agiliza el desarrollo de los mismos, indistintamente si se trata de proyectos en fase de pre factibilidad o si se trata de proyectos de rehabilitación, en donde uno de los puntos fuertes es la reducción considerable en los márgenes de error, marcando una clara diferencia con las metodologías de elaboración de proyectos en 2D.

#### 1.1.1.3. Parametrización

La sencillez de poseer grandes cantidades de información que se sujetan a la vez en parámetros le da importancia al trabajo en el marco de la metodología BIM que le hace destacar.

#### 1.1.1.4. Visualización Del Modelo

Previo a la implementación de metodologías BIM, el seguimiento de los procesos constructivos se realizaba mediante la representación de planos 2D, gráficas y tablas numéricas totalmente independientes entre ellas, etc; incluso a través de representaciones generadas a partir de datos de otras representaciones originales. Aspectos que precisamente demuestran el fallo de ese sistema, y es que modificaciones en el modelo, implicaban la revisión de todas las representaciones y su eventual corrección. Por su parte a través de la tecnología BIM, antes que hacer uso de estas representaciones, lo que puede hacerse es un análisis de la información contenida en el modelo central.

#### 1.1.1.5. Componentes Del Modelo BIM

Cada palabra que compone la sigla BIM representa no sólo el término literal, sino también un concepto y función que gestiona el modelo.

##### 1.1.1.5.1. Edificio (Building)



En esta metodología la edificación se entiende como un proyecto colaborativo compuesto por áreas en constante diálogo. A través de ese canal se discuten soluciones anticipadamente y que siendo críticas para el diseño del proyecto prevén problemas en las etapas de ejecución. La visualización en tres dimensiones ayuda a comprender las decisiones durante el desarrollo del proyecto. La representación de las fases en el ciclo de vida del mismo, y que ayuda a considerar todos los elementos en juego anticipando necesidades futuras, como por ejemplo el impacto ambiental de la edificación, su eficiencia energética y los costos operativos (HildebrandtGruppe, 2015).

#### 1.1.1.5.2. Información (Information)

*“Utilizar la metodología de trabajo BIM y sus plataformas significa la creación y desarrollo de una base de datos en constante actualización. La información contenida en este sistema se encuentra abierta para todos los integrantes del equipo, quienes pueden usarla, reutilizarla y optimizarla cuando sea necesario. Además, puede incluirse como una entrega para el mandante, si se compromete dentro del proyecto”* (HildebrandtGruppe, 2015).

#### 1.1.1.5.3. Modelado (Modeling)

Bien sea por modelado o por la administración del modelo, en esta parte de la metodología se resalta el hecho de que la estructura es construida sobre datos organizados, dando forma a un sistema que luego puede ser administrado y actualizado por el parte del mandante (HildebrandtGruppe, 2015).

### 1.2.5. BIM para edificios del patrimonio cultural

La descripción de Pauwels y Logothetis para lo que puede lograrse implementando la tecnología BIM se organiza en diferentes escenarios, uno en donde se logra documentar, generar, importar y manipular modelos tridimensionales utilizando información paramétrica a partir de dibujos técnicos detallados, y que ubica al modelo en una escala “2D”. El siguiente en donde el modelo contempla las propiedades geométricas y se apoya en su carácter colaborativo, el cual se denomina “3D”. Uno más en donde ahora se incluye la programación temporal constructiva del proyecto, y se conoce como “4D”. En la siguiente escala el modelo permite la definición de cantidades y presupuestos, con lo cual se denominaría “5D”. Otro



en donde además de todo lo anterior, además es posible evaluar la sostenibilidad del proyecto, y que correspondería a un modelo “6D”. Y finalmente el modelo en donde también se analizan la gestión del ciclo de mantenimiento y de vida del mismo, denominado “7D”.



**Figura 3. Dimensiones de la tecnología BIM**

**Fuente: (Martínez Villa, 2018)**

#### 1.1.1.6. Softwares BIM: Grupos

En la práctica, los softwares BIM más especializados que se pueden utilizar para llevar a cabo el modelado, mantenimiento y rehabilitación del patrimonio arquitectónico, se clasifican en tres grandes grupos de herramientas diferentes, existen los Modeladores 3D, los Visualizadores 3D y los analizadores.

Los primeros pueden utilizarse para el diseño y representación de modelos paramétricos capaces de representar digitalmente una edificación. Los segundos cuya función principal es la de transmitir la información obtenida de los modelos hacia el receptor. Y los terceros, que como su nombre lo indica, se encargan del análisis y la gestión de los archivos tridimensionales.

De manera general Building Information Modeling (BIM) es un enfoque del diseño de edificios que se caracteriza por la creación y el uso de información que es posible incluir



como base de datos y que permite coordinar de manera lógica, todo gracias a la utilización de un modelador de construcción paramétrico, como Revit, (Grupoabstract, 2019).

### **1.2.6. Autodesk Revit**

Autodesk Revit es un software de diseño inteligente de modelado BIM para arquitectura e ingeniería, que facilita las tareas de diseño de proyecto y los procesos de trabajo. Los objetos inteligentes (familias paramétricas) que se logran a través del uso de este programa, se convierte en su principal característica. Revit se basa en BIM: metodología de trabajo colaborativa y usando el modelado paramétrico de objetos y elementos constructivos del edificio.

El desarrollo en Revit implica además de dibujar los elementos, un proceso de construcción tridimensional, el modelado BIM propiamente dicho, en donde por ejemplo es posible ver y revisar el edificio en 3D, el cual se construye virtualmente en base a familias (objetos) de muros, ventanas, puertas, de diferentes materiales, cuya información se almacena gracias a su base de datos relacional que coordina la información durante todo el proceso (Rendersfactory, 2018).

### **1.2.7. Registro de datos térmicos**

Como complemento de la recolección de información así como de la referenciación de datos, se podría incluir el registro de información térmica del tramo estudiado, considerando su análisis en relación inicialmente hacia la arquitectura de los elementos. El termohigrómetro se puede utilizar para reconocer la emisividad de la superficie a analizar, registrando la temperatura de la superficie del objeto incluyendo el uso de la cámara.

En el método cuantitativo la interpretación de la imagen térmica se basa en la identificación numérica de parámetros, para lo cual se utilizan distintos tipos de software, tales que permitan enfocar los análisis hacia los modos de estimular el fenómeno tales como la radiación solar y el flujo de aire para ayudar en la detección de defectos en la envolvente arquitectónica.

Las termografías cualitativas que se obtienen a través de esta clase de técnicas presentan una gran claridad y contundencia de la imagen, las cuantitativas agregan información que permite una evaluación precisa del comportamiento de la envolvente con relación al intercambio energético interior exterior (Riondet, y otros, 2019).



El análisis de las patologías de una estructura mediante la termografía IR es una técnica no destructiva que permite medir a través de una cámara termográfica la temperatura de una superficie y localizar con precisión las pérdidas y ganancias de energía. Tiene muchas aplicaciones y permite estudiar las propiedades energéticas o niveles de aislamiento de una edificación, permitiendo identificar, entre otros, problemas de humedad, falta de aislamiento, debilidades de infraestructura y fallos en cerramientos. Se trata de un método no invasivo, para cuya aplicación no es necesario realizar catas ni contacto físico.

Entre sus productos destaca que aporta un mapa bidimensional (imagen) térmica del objeto y mide en forma precisa la temperatura. En general la termografía infrarroja es una tecnología que permite ahorrar costes, conocer las condiciones generales de la infraestructura, reducir fallos y prolongar la vida útil de los equipos (Navarro Sánchez & Salandín, 2019).

### **1.3. ANTECEDENTES**

Cartagena de Indias además de ser un Patrimonio Nacional, es desde 1984 declarada por la UNESCO “Patrimonio Histórico de la Humanidad” por tal razón las autoridades tanto nacionales como locales tienen el deber de velar por la preservación de dicho patrimonio. Son las murallas de Cartagena parte fundamental para la obtención de este importante título, motivo por el cual han sido objeto de múltiples proyectos de investigación y estudio, a los cuales es menester remitirse con el fin de determinar los elementos constructivos y las características de estas estructuras, de tal manera que puedan ser utilizados para la aplicación de las metodologías BIM y además es necesario también indagar y conocer como se está adaptando el país al uso de esta tecnología.

“PLAN DE IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍA BIM EN EL CICLO DE VIDA DE UN PROYECTO, (Cerón & Liévano Ramos, 2017)”.

Este es un trabajo de grado realizado para una especialización en gerencia de obras, realizado en la ciudad de Bogotá. Este proyecto investigativo buscó implementar unas fases de trabajo para utilizar la metodología BIM en las compañías constructoras, desarrollando un modelo 3D y unas bases de datos organizadas.



En Colombia y concretamente en Bogotá, los procesos constructivos y los procesos de diseños técnicos para proyectos de obras civiles tienen un bajo nivel de tecnología y poco nivel de coordinación técnica entre las diferentes disciplinas que intervienen en el mismo, lo cual produce grandes conflictos, reprocesos, sobrecostos, atrasos que afectan de una forma negativa el ciclo de vida de un proyecto.

Lo que significaría para Bogotá la implementación efectiva de la metodología BIM se reflejaría en una mejora radical hacia la efectividad, en especial, de los procesos gerenciales de las compañías dedicadas al desarrollo de proyectos, lo cual beneficiaría económicamente cada proceso optimizado y cada reproceso economizado (Cerón & Liévano Ramos, 2017).

“EL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO Y FORTIFICACIONES EN CARTAGENA DE INDIAS, Alfonso Rafael Cabrera Cruz. (2017)”.

La tesis doctoral del Arquitecto Cabrera es una investigación de tipo cualitativo basada en el análisis del material documental encontrado, clave en los procesos de gestión del patrimonio cultural y arquitectónico de la ciudad de Cartagena de Indias; la revisión de los estándares de gestión internacional definidos por la UNESCO, así como las actuaciones de diferentes entidades de nivel internacional, nacional y local, relacionadas con la protección del patrimonio.

La metodología empleada se complementó con la revisión del estado del arte, a través de fuentes documentales sobre la materia, que se refieren a la síntesis de los estudios históricos, técnicos, económicos y regulatorios sobre el patrimonio; la evolución de la ciudad, su realidad actual y la construcción de un estándar de gestión integrado (Cabrera Cruz, 2017).

Esta investigación brinda una documentación detallada sobre la evolución y tipo de construcción de las murallas de Cartagena, información útil para llevar a cabo la implementación de la metodología BIM a un proyecto de investigación e intervención de estas fortificaciones.

“DIAGNÓSTICO DE LOS PATRONES DE DETERIORO EN EL MATERIAL PÉTREO DE LA MURALLA INFLUENCIADO POR EL AMBIENTE HÚMEDO Y SALINO EN LA CIUDAD DE CARTAGENA, (Acuña Robles, 2012)”.



El trabajo de Acuña Robles buscaba el diagnóstico y la formulación de recomendaciones relacionadas con los patrones de deterioro de los materiales que componen la escarpa de la muralla, teniendo en cuenta el entorno húmedo y salino al cual está expuesta, específicamente en el tramo entre los Baluartes de San Ignacio y de San Juan Evangelista.

En consonancia con los resultados obtenidos, el diagnóstico se complementa reconociendo el efecto estético y físico que la contaminación del aire tiene sobre la estructura, el cual es responsable de su color actual y textura, que además se relacionan con otros estudios que concluyen sobre el deterioro progresivo de la estructura de muralla (Acuña Robles, 2012).

“EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA Y VIBRACIONAL EN LAS MURALLAS DE CARTAGENA DE INDIAS, EN EL SECTOR QUE COMPRENDE DESDE LAS BÓVEDAS HASTA EL HOTEL SANTA CLARA, José Cueto, Eliana Granger, (2010)”.

Con ayuda del programa SAP2000 V14 se ha modelado estructuralmente, el tramo entre Las Bóvedas y el hotel Santa Clara, para hallar que la contraescarpa es el elemento más afectado por la combinación de esfuerzos pre-existentes con ondas emitidas por los buses correspondientes al sistema de transporte público y ante un eventual sismo, con valores que sobrepasan los máximos admisibles de tensión tanto en la piedra coralina como en el material compuesto (Cueto Ferreira & Granger Serrano, 2010).

“EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA Y VIBRACIONAL DE LAS MURALLAS DEL SECTOR QUE COMPRENDE EL HOTEL SANTA CLARA HASTA EL CLAUSTRO DE LA MERCED DE LA CIUDAD DE CARTAGENA DE INDIAS”, María Oliveros, (2011).

En ese mismo sentido, en 2011 los resultados reportados por María Oliveros aplicando una metodología similar, pero para el tramo de muralla entre el Hotel Santa Clara y El Claustro de La Merced, indicaban a través de ensayos y modelaciones el excelente comportamiento de la piedra coralina a esfuerzos de compresión, así como la deficiente resistencia ante los esfuerzos de tensión que se generan, indicando también que la contraescarpa es la que se ve más afectada en todas las condiciones que se simularon (Oliveros Jiménez, 2011).

“EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA Y VIBRACIONAL EN LAS MURALLAS DE CARTAGENA EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE EL



RESTAURANTE LA VITROLA Y EL HOTEL SANTA TERESA”, Edgardo Pantoja, Miller, (2012).

Esta clase de estudios se replicaron para 2012, esta vez caracterizando los materiales que componen la muralla a través de un inventario de las lesiones que existen en la escarpa, para calificar su estado y determinar los coeficientes de reducción de resistencia por estado de la estructura, calidad de diseño y construcción, en el caso de Pantoja y Arzuza, cuando evaluaron la vulnerabilidad sísmica-estructural y vibracional de las murallas, ante los efectos vibratorios en el tramo (Pantoja Martínez & Arzuza Díaz, 2012).

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA Y VIBRACIONAL EN LAS MURALLAS DE CARTAGENA DE INDIAS, EN EL SECTOR QUE COMPRENDE DESDE EL CONVENTO DE LA MERCED HASTA EL RESTAURANTE LA VITROLA, John Gil, Carlos Lascarro, (2012).

Para 2012 también se formuló un estudio para evaluar la vulnerabilidad sísmica y vibracional en el sector que comprende desde el Convento de La Merced hasta el restaurante La Vitrola, ante un eventual sismo o efecto vibracional ocasionado por los vehículos de Transporte Público, con el fin de formular recomendaciones en pro de su preservación al mantenerlas en el espacio y en el tiempo, en el cual, teniendo como base los resultados obtenidos de la investigación (Gil Moreno & Lascarro Estrada, 2012).

En el marco del estudio de las necesidades que tiene la ciudad para la protección del patrimonio es conveniente mencionar lo referente a los Planes Especiales de Manejo y Protección (PEMP), los cuales comprenden un instrumento de gestión del Patrimonio Cultural de la Nación, para establecer las acciones necesarias con el objetivo de garantizar la protección, conservación y sostenibilidad de los Bienes de Interés Cultural (BIC ) o de los bienes que pretendan declararse como tales si a juicio de la autoridad competente dicho Plan se requiere (Ministerio de Cultura, 2018).

En ese sentido, dentro de la normativa de Cartagena construida y en construcción, y con la que se rige actualmente la gestión de la ciudad, no se tuvo contemplado el cordón amurallado ni el Castillo de San Felipe de Barajas; por lo tanto, el PEMP murallas y castillo se desarrolló procurando la inclusión de este Bien Patrimonial dentro de la herramienta de gestión de la ciudad y a la articulación con el PEMP de Centro Histórico (Ministerio de Cultura, 2018).



“MODELO 3D DE LAS MURALLAS DE CARTAGENA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA BIM, INTEGRANDO INFORMACIÓN ESPECÍFICA SOBRE SU ESTADO DE CONSERVACIÓN EN EL TRAMO COMPRENDIDO DESDE EL BALUARTE SAN PEDRO MÁRTIR HASTA BALUARTE DE SANTA CLARA”, (Berrío Villadiego & Moterrosa Moreno, 2019).

Para año 2019 desde la Universidad de Cartagena se formuló un estudio para el tramo comprendido entre el Baluarte San Pedro Mártir hasta el Baluarte de Santa Clara, el cual tuvo como objetivo elaborar un modelo 3D aplicando la metodología BIM mediante el software Revit, con el fin de integrar de forma visual e interactiva información disponible y necesaria que propicie su monitoreo y conservación para dicho tramo (Berrío Villadiego & Moterrosa Moreno, 2019). Este estudio se asemeja a lo que se propone ejecutar en el presente trabajo, pero para el tramo comprendido entre el Baluarte San José y el Baluarte Santa Bárbara.

Con el desarrollo del presente proyecto se establecen precedentes hacia la continuación del estudio del tramo correspondiente, en el sentido de que para el desarrollo de estudios técnicos, como el de (Berrocal Olave, 2016), en donde se llegan a formular soluciones y recomendaciones tales como recubrir las rocas desgastadas y rellenar las áreas socavadas en cuanto a la cimentación de la Batería de San José, además de la construcción de una obra de protección con enrocado que permita una disipación de energía del oleaje que pueda impactar sobre la estructura, es completamente necesario el diagnóstico inicial como el que pretende esta clase de estudios.



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar un modelo digital tridimensional de las murallas de Cartagena, específicamente en el tramo comprendido entre el Baluarte de La Merced y el Baluarte de Santo Domingo, con el uso de un software de tecnología BIM (Building Information Modeling), para entregar una herramienta interactiva y visual, que integre toda la información necesaria para el diagnóstico del estado general y conservación de estas fortificaciones.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

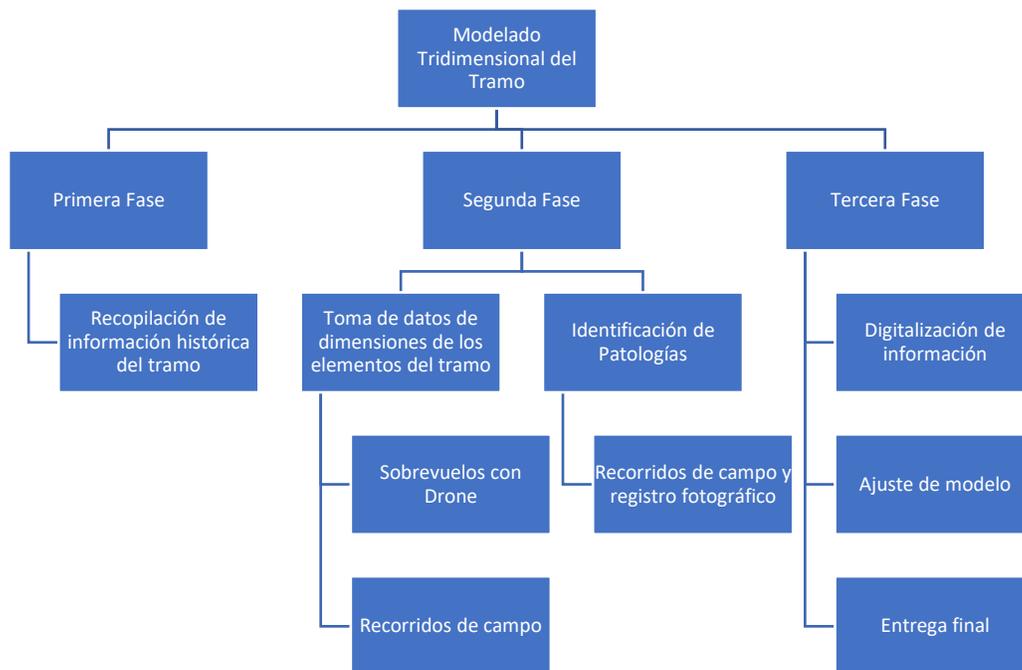
- Clasificar e identificar la información disponible sobre los estudios realizados en el cordón amurallado de Cartagena a lo largo de la historia.
- Ubicar e identificar patologías presentes en la estructura del tramo seleccionado, de acuerdo a los parámetros que establece la guía ICOMOS de las Naciones Unidas
- Realizar un modelo digital de información central de las murallas, de donde las entidades encargadas de la conservación tengan la disponibilidad de cargar y descargar información de manera actualizada, para facilitar la coordinación en los proyectos de intervención.



### 3. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del proyecto propuesto, en donde se contemplaron las actividades de búsqueda de información, la recolección de la misma en campo y el procesamiento de datos, se establecieron una serie de pasos tanto para la obtención de la información así como para la elaboración del modelo en 3D. Por lo tanto, el tipo de investigación realizada es descriptiva ya que se inició con la búsqueda de la información, la recolección de los datos, análisis y finalmente la interpretación de los datos arrojados, describiendo así el proceso metodológico utilizado. (Metodologia de la investigacion, Cap 3, 2014).

En la Figura 4 se muestra esquemáticamente el proceso metodológico que se implementó para el desarrollo del presente trabajo, el cual tuvo como lapso de tiempo para desarrollo el primer período académico de 2020 en la ciudad de Cartagena específicamente en el tramo de muralla comprendido entre el Baluarte de La Merced y el Baluarte de Santo Domingo.



**Figura 4. Esquema metodológico propuesto. Fuente: Los Autores.**



**Tabla 1. Resumen del proceso metodológico ejecutado. Fuente: Los Autores.**

<b>Fase</b>	<b>Descripción</b>
<b>Primera</b>	Consistió en la revisión de material histórico, informes de investigaciones anteriores, para complementar la información sobre los materiales utilizados para la construcción del tramo de estudio.
<b>Segunda</b>	Consistió en la toma de datos a través de sobrevuelo con dron y el respectivo registro fotográfico del tramo. Se identificaron a través de la inspección visual al tramo las patologías más comunes que presenta el tramo, generando un registro de ubicación y caracterización de las mismas.
<b>Tercera</b>	Consistió en la construcción del modelo tridimensional del tramo utilizando la herramienta Revit, que se alimentó con la información producto del procesamiento de datos a partir de los sobrevuelos y las fotografías registradas para el tramo de estudio. Se construyó el modelo geométrico y se asignaron las características correspondientes según el inventario de patologías y la información histórica recopilada.

La serie de pasos a seguir para el cumplimiento de los objetivos planteados en el presente trabajo investigativo es la siguiente: recolección de la información de tipo secundario, posteriormente la recolección de la información primaria y por último, la etapa de modelación 3D del tramo de estudio.

### **3.1. PRIMERA FASE: RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE**

Inicialmente se procedió con la revisión bibliográfica de investigaciones y estudios que se han realizado y que relacionan los aspectos a tener en cuenta en la construcción del modelo, como son: composición geométrica, características de los materiales, registros patológicos, fisuras, grietas y zonas afectadas por la humedad aplicados en el tramo de estudio y como complemento a lo anterior se realizaron consultas a investigadores y profesionales del tema.

Posteriormente se seleccionó y clasificó la información que haría parte del modelo, además se evaluaron los planos históricos suministrados por el Instituto de Patrimonio y Cultura de Cartagena (IPCC) y levantamientos arquitectónicos realizados por estudiantes de pregrado



de arquitectura de la Universidad Jorge Tadeo Lozano, dirigidos por el Dr. Alfonso Cabrera Cruz.

Se procedió a la búsqueda de información en textos, tesis, páginas webs, podcasts, libros, artículos, etc., toda la información disponible sobre estudios anteriormente realizados al cordón amurallado por investigadores en materia de patologías existentes en el tramo de la muralla, que para la presente investigación es caso de estudio.

Además, después de haber consultado toda la información concerniente al estudio de las patologías encontradas hasta el momento en el cordón amurallado, se comentó sobre el contraste entre la manera como se ha hecho hasta el momento y la forma en cómo la tecnología BIM puede contribuir a la rehabilitación e intervención de un bien patrimonial, en este caso, la muralla de Cartagena.

### **3.1.1. Composición geométrica**

De acuerdo a lo indicado en el documento de (Berrío Villadiego & Moterosa Moreno, 2019) en toda la extensión del cordón amurallado se identifican dos tipos de estructuras en mayor medida, las cuales se conocen como la cortina o lienzo de muralla y el baluarte o bastión, que tienen su definición técnica en el manual de uso y aprovechamiento económico del espacio público de Cartagena de Indias (2010) de la siguiente manera.

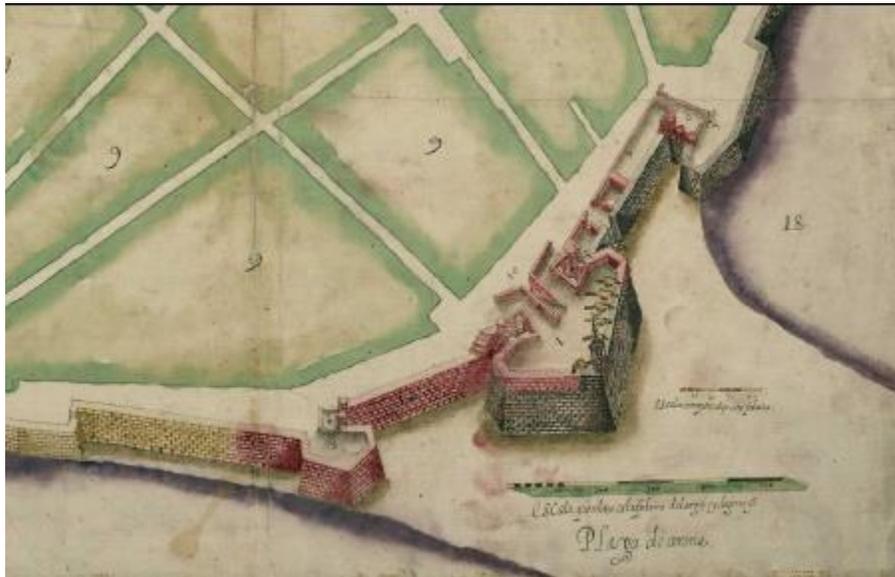
- **Baluarte:** Pequeño fuerte armado, generalmente antecedido por una plaza baja en la que se localiza una rampa de acceso a su plataforma superior. Cuenta en su plataforma superior con garitas. (Aforca., 2004).
- **Cortina:** Muro escarpado y recto que une dos baluartes para formar un frente defensivo o abaluartado dinámico en el que se establecían los fuegos directos y cruzados. En las cortinas se encuentran puertas que comunican el recinto interior con el exterior de las murallas y bóvedas que eran utilizadas como sitios de almacenamiento, baños públicos, etc. (Aforca., 2004).

En resumen, a nivel constructivo la muralla está compuesta por cuatro elementos: la escarpa, un muro exterior inclinado; la contraescarpa, un muro interior recto; el relleno, material que llena el espacio entre la escarpa y la contraescarpa; y la plataforma, el acabado superior del relleno (Aforca., 2004).



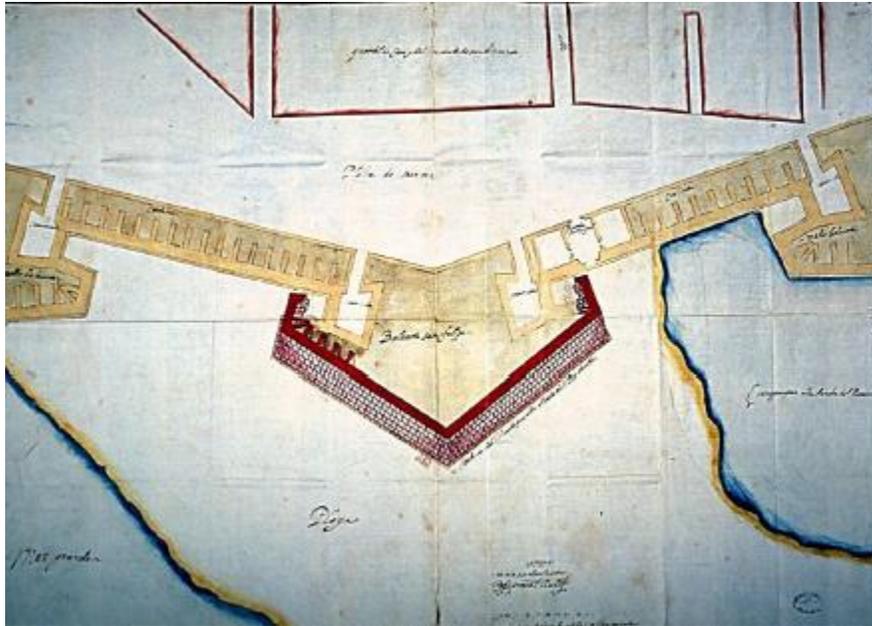
### 3.1.2. Contexto histórico

Del Baluarte de Santo Domingo se puede decir que según los registros es donde se inicia el proceso constructivo de las murallas de Cartagena, lo cual se hizo a través del acto simbólico colocando la primera piedra con un cofre que puede contener elementos que indican el periodo de construcción por Cristóbal de Roda (Cabrera Cruz, 2017).



**Figura 5. Detalle de la cortina entre baluarte de Santiago y Santo Domingo.**  
(Cabrera Cruz, 2017)

El Baluarte de San Felipe-Santo Domingo ha sido protagonista de la historia de la ciudad y sobresale en el centro histórico, con su figura simétrica cuyos ángulos se generan en una plaza frente de cinco lados. Consta de dos caras, dos flancos con sus ángulos, dos orejones, dos ángulos fijantes y dos plazas bajas o casamatas, que se corresponden cada ángulo y de donde salían cuatro cañones (Cabrera Cruz, 2017).

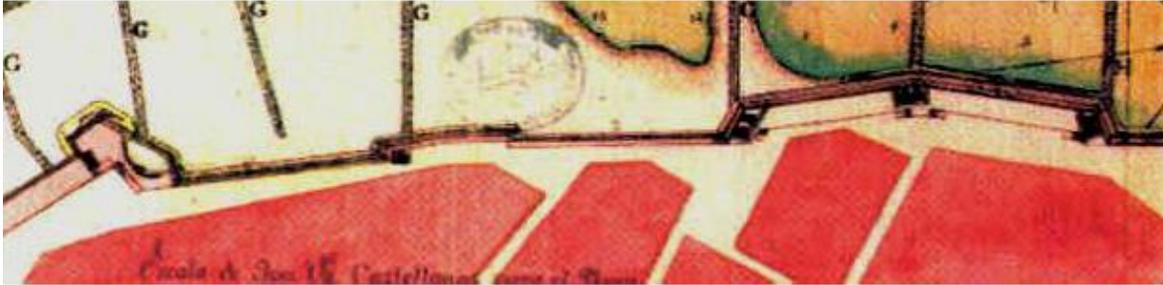


**Figura 6. Frente de plaza de baluartes de San Felipe o de Santo Domingo, con Santiago y la Cruz, 1617. (Cabrera Cruz, 2017)**

En estas obras fue muy notable la invasión de las áreas externas del cordón de murallas por los barrios extramuros ya demolidos, llamados Boquetillo, Pueblo Nuevo y Pekín. La afectación fue notable hacia la contaminación de los vestigios originales de forma superficial y adosándose a las escarpas, en un momento en que las murallas eran consideradas un estorbo para el desarrollo urbano (Cabrera Cruz, 2017).

El baluarte de Santa Cruz por su parte, tenía una casamata o plaza baja destruida por el mar pero conservada parcialmente, de las cuales son claras sus troneras, y de acuerdo a los planos de Roda, se perciben interiormente decenas de estribos que por tipologías constructivas, normalmente consistían en arcadas sucesivas (Cabrera Cruz, 2017).

Al baluarte de Santa Cruz le falta la primera cara, el parapeto y el flanco; herrera propuso restaurar lo que le faltaba a la altura original, relleno totalmente las casamatas originales, modificando su interior con un muro dejando su acceso convertido en una bóveda de almacén de pólvora. Estuvo sometido al deterioro ocasionado por el abandono y la cercanía al mar durante 150 años (Cabrera Cruz, 2017).



**Figura 7. Detalle Baluarte Santa Cruz, Ballestas y la Merced.  
(Cabrera Cruz, 2017)**

De acuerdo a lo expresado por el Arquitecto Alfonso Cabrera, en gran parte del parapeto del Baluarte de Santa Cruz, se observan unas ranuras a manera de aspillerado para fusilero, realizadas por Don Blas de Lezo y Sebastián de Eslava entre 1740 y 1741, habilitando la plataforma para colocar sobre ella la nueva artillería navas recién llegada de España en remplazo de la vieja (Cabrera Cruz, 2017).

En el tramo la estructura siguiente denominada Plataforma de Ballestas impedía el acceso del enemigo por el mar del norte, construida principalmente por Cristóbal de Roda en 1617, pero que con las acometidas del mar se derrumban. Para 1721 Juan de Herrera y Alberto Miensson ejecutan una obra defensiva a partir del Baluarte de Santo Domingo hasta el de Santa Catalina que involucraba al baluarte de San Carlos, suprimido y reconstruido entre 1764 a 1769 por Arévalo, cambiando la denominación de Baluarte San Carlos por la de plataforma de Ballestas (Cabrera Cruz, 2017).

Por su parte el Baluarte de La Merced nunca fue construido, por lo que se le llamó baluarte vacío. Se le practicaron unos capialzados o troneras, como las de una casamata o plaza baja. Actualmente se encuentra parcialmente sepultada su plataforma, rampas y contraescarpa, con más de dos metros de escombros y un área de parqueaderos que reposan sobre la plataforma (Cabrera Cruz, 2017).

### **3.1.3. Información de los materiales**

Así mismo (Berrío Villadiego & Moterrosa Moreno, 2019) en su trabajo de investigación indican que el principal material utilizado en la construcción de las murallas de Cartagena es la piedra caliza de origen coralino y sedimentario extraída de canteras y tallada hasta alcanzar un tamaño específico. Para la cual destacan cómo sus características petrográficas y físico-mecánicas le confieren una calidad técnica y durabilidad muy notables para su utilización



como material de construcción estructural y ornamental. Berrío y Monterrosa destacan entre los principales parámetros que determinan estas cualidades la mínima porosidad eficaz y asociado a ello sus excelentes propiedades hídricas, así como sus elevadas resistencias mecánicas y el bajo coeficiente de anisotropía textural, tanto elástico como mecánico (Díaz Andrade & Méndez Pineda, 2015).

Las rocas que hacen parte la composición de las murallas se pueden clasificar en dos tipos: rocas con textura de posicional reconocible y rocas con textura de posicional no reconocible, según lo que indican Berrío y Monterrosa en su consulta del libro Factores ambientales en las murallas de Cartagena de Indias (Quiñones, 2017).

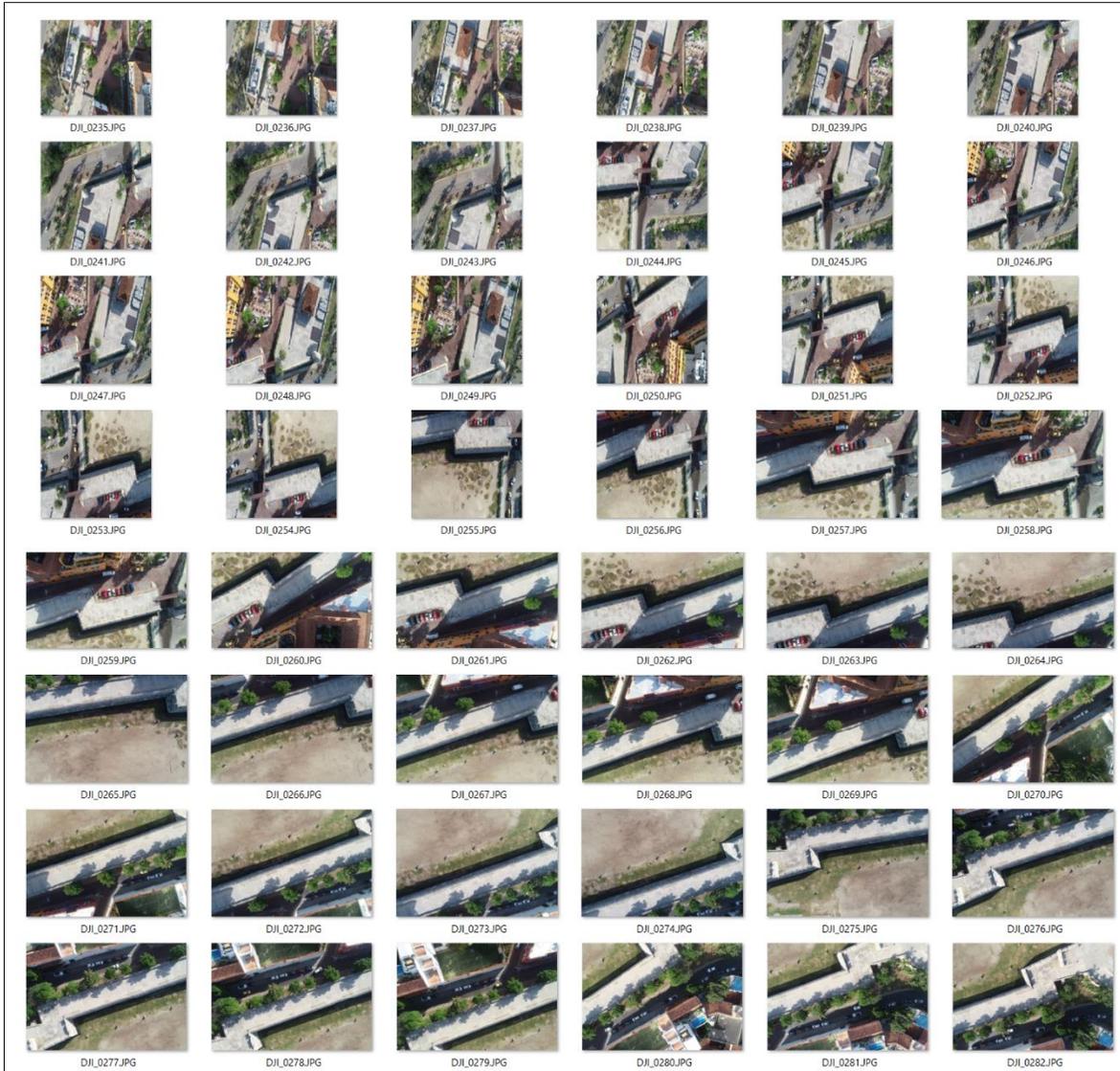
### 3.2. SEGUNDA FASE: RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN PRIMARIA

Se realizó un sobrevuelo con dron del tramo en estudio para la recopilación de información fotográfica que luego sería procesada a través de un programa de computador para generar una imagen en tres dimensiones que serviría de base para la construcción del modelo tridimensional en Revit.

En la Figura 8 con la delimitación del tramo de estudio se programó el sobrevuelo, a través del cual se obtuvo el registro fotográfico, de que se muestra una parte entre la Figura 9 y la Figura 10.



Figura 8. Delimitación tramo de estudio. Tomado y modificado de Google Earth, 2020.

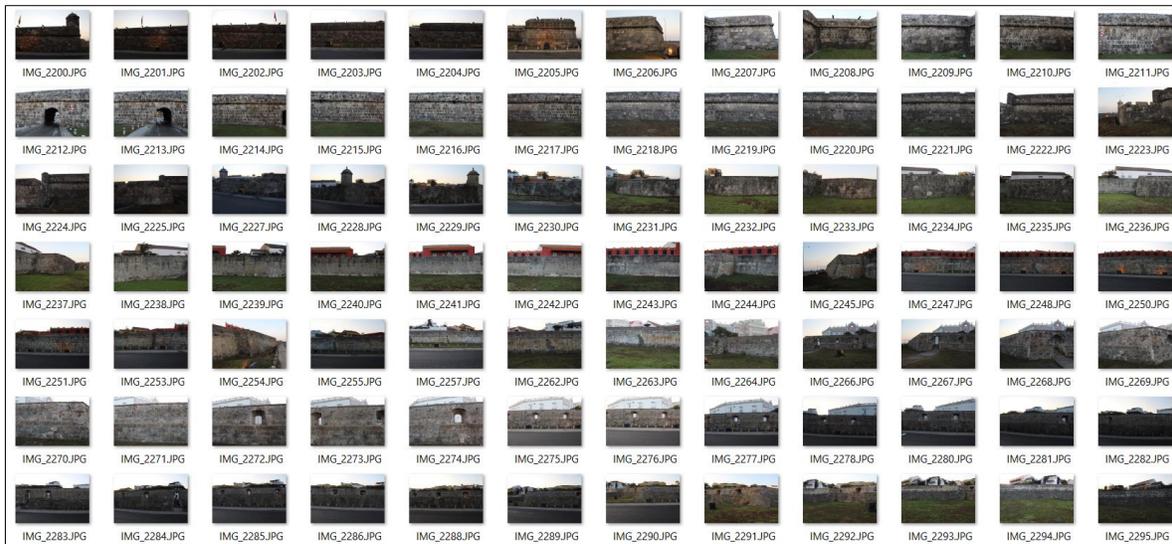


**Figura 9. Secuencia de fotografías tomadas con drone. Sector Baluarte Santo Domingo. Fuente: Autores.**

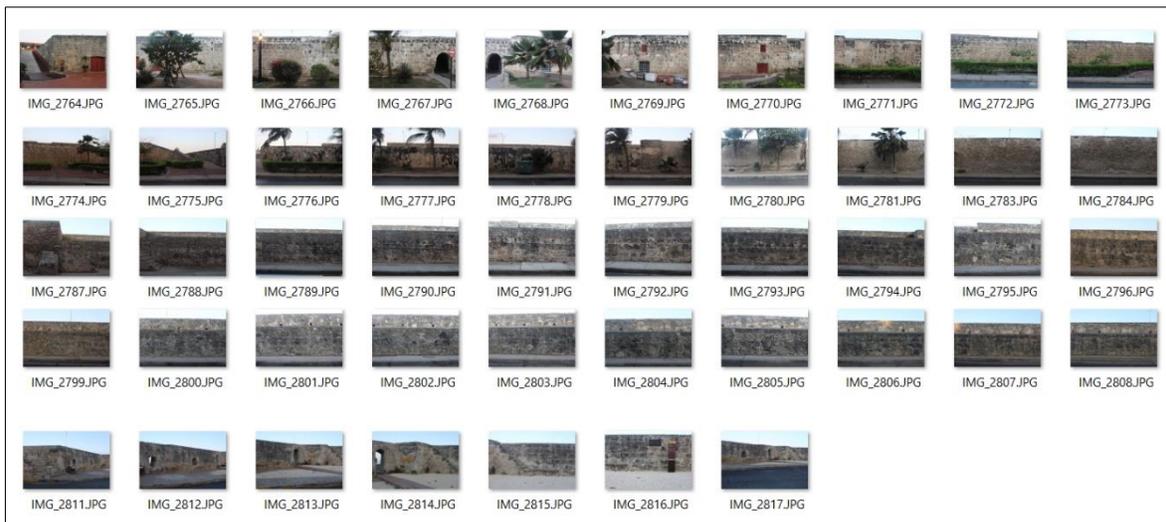


**Figura 10. Secuencia de fotografías tomadas con drone. Sector Baluarte Santo Domingo. Fuente: Autores.**

Así mismo, se complementó el registro fotográfico a nivel del terreno tomando datos tanto de la escarpa como de la contraescarpa, teniendo en cuenta que esta es información que alimentará la construcción de la imagen tridimensional del modelo. En la Figura 11 y la Figura 12 se muestran parte de los registros que complementan la visual de los elementos del tramo.



**Figura 11. Parte de la secuencia de fotografías de la escarpa del tramo en estudio. Fuente: Autores.**



**Figura 12. Parte de la secuencia de fotografías de la contraescarpa del tramo en estudio. Fuente: Autores.**

Además, y teniendo en cuenta lo que la guía ICOMOS indica para la descripción del mapeo de las posibles formas de alteración que pueden afectar la estructura de la muralla, se tienen en cuenta las recomendaciones citadas en el PEMP respecto al esquema de clasificación por grupos, el cual implica una identificación visual de las patologías, las cuales con posterioridad se plasmarán en el modelo a generar. En la Tabla 2 se resume la clasificación de acuerdo a la guía ICOMOS en cuanto a los esquemas patológicos.



**Tabla 2. Resumen de esquemas de clasificación de patologías, de acuerdo a la guía ICOMOS.**

Grupo	Patologías	
<p><b>Grupo 1. GRIETAS Y DEFORMACIONES.</b> Transformaciones en los elementos constructivos de las murallas a causa de un esfuerzo mecánico.</p>	<p><b>Grieta.</b> Abertura longitudinal incontrolada de un elemento constructivo que varía en cuanto a tamaño y forma.</p>	
	<p><b>Fractura.</b> Grietas que atraviesan el material en su totalidad, pueden tener aberturas considerables de varios centímetros en dos o más partes de los elementos.</p>	
	<p><b>Fisura.</b> Pequeñas grietas superficiales en los componentes, algunas son milimétricas apenas perceptibles.</p>	
<p><b>Grupo 2. DESPRENDIMIENTOS.</b> Pérdida de material en los componentes que puede ser originada por las condiciones ambientales a las que se exponen los materiales.</p>	<p><b>Desintegración por desmoronamiento.</b> Originadas por la disminución en la resistencia del material, volviéndolo susceptible a cualquier acción física, la cual se manifiesta en fragmentación o quebrado del material.</p>	
	<p><b>Desintegración granular.</b> Su presencia se genera en la superficie del material, presentándose a menor escala una pérdida de material en partículas pequeñas. Este deterioro es identificable al tacto.</p>	
	<p><b>Fragmentación por astillamiento.</b> Corresponde al desprendimiento de pedazos del cuerpo del material constitutivo en pedazos puntiagudos.</p>	
<p><b>Grupo 3. PÉRDIDA DE MATERIAL.</b> Se define como la separación de materiales o la desintegración de estos.</p>	<p><b>Erosión.</b> Se entiende como la pérdida de material por causas naturales, en la superficie de las piedras, morteros y ladrillos que conforman el lienzo de muralla.</p>	
	<p><b>Alveolización.</b> Se evidencia la formación de cavidades o alveolos en la superficie del material, ocasionada por la acción del aire y del agua. En algunos casos la presencia de sales puede intensificar el tamaño de las cavidades y su cristalización al interior.</p>	
<p><b>Grupo 4. DECOLORACIÓN Y DEPÓSITO.</b> Modificación del color de la piedra ya sea por la coloración, decoloración o acumulación de materiales de espesor variable.</p>	<p><b>Costras.</b> Masas de grosores heterogéneos acumulados en la superficie del material y depositados en las cavidades de estos.</p>	<p><b>Costra negra.</b> Corteza oscura presente en los materiales en donde se evidencia un cambio de color.</p>
		<p><b>Costra de sal eflorescencia.</b> Corteza clara producida por sales solubles.</p>
	<p><b>Depósito.</b> Acumulación de materiales externo adherido a la piedra.</p>	
	<p><b>Graffiti.</b> Dibujos, grabados, o marcas sobre la piedra realizados por el hombre con pintura o tinta.</p>	
	<p><b>Manchas.</b> Depósito superficial de partículas que dan apariencia de suciedad.</p>	
<p><b>Grupo 5. COLONIZACIÓN BIOLÓGICA.</b> Daños por microorganismos o plantas que crecen directamente sobre la superficie de la piedra y los componentes del BIC. Para determinar los subtipos es necesario realizar estudios de laboratorio específicos.</p>	<p><b>Algas.</b> Conformados por cianobacterias y algas verdes, verdin.</p>	
	<p><b>Musgos.</b> Organismos vegetales con apariencia de tapete.</p>	
	<p><b>Moho.</b> Hongo microscópico con apariencia de algodón, negro, gris, o blanco.</p>	
	<p><b>Plantas.</b> Vegetación adherida en piedra o el BIC.</p>	

Fuente: (Ministerio de Cultura, 2018).

Enmarcado en la identificación previa de puntos de interés, en específico para el registro de medidas, fotografías, y en general para el complemento de información que se registró a través de los sobrevuelos con dron, se ejecutaron recorridos y el registro del álbum fotográfico se muestra a continuación.



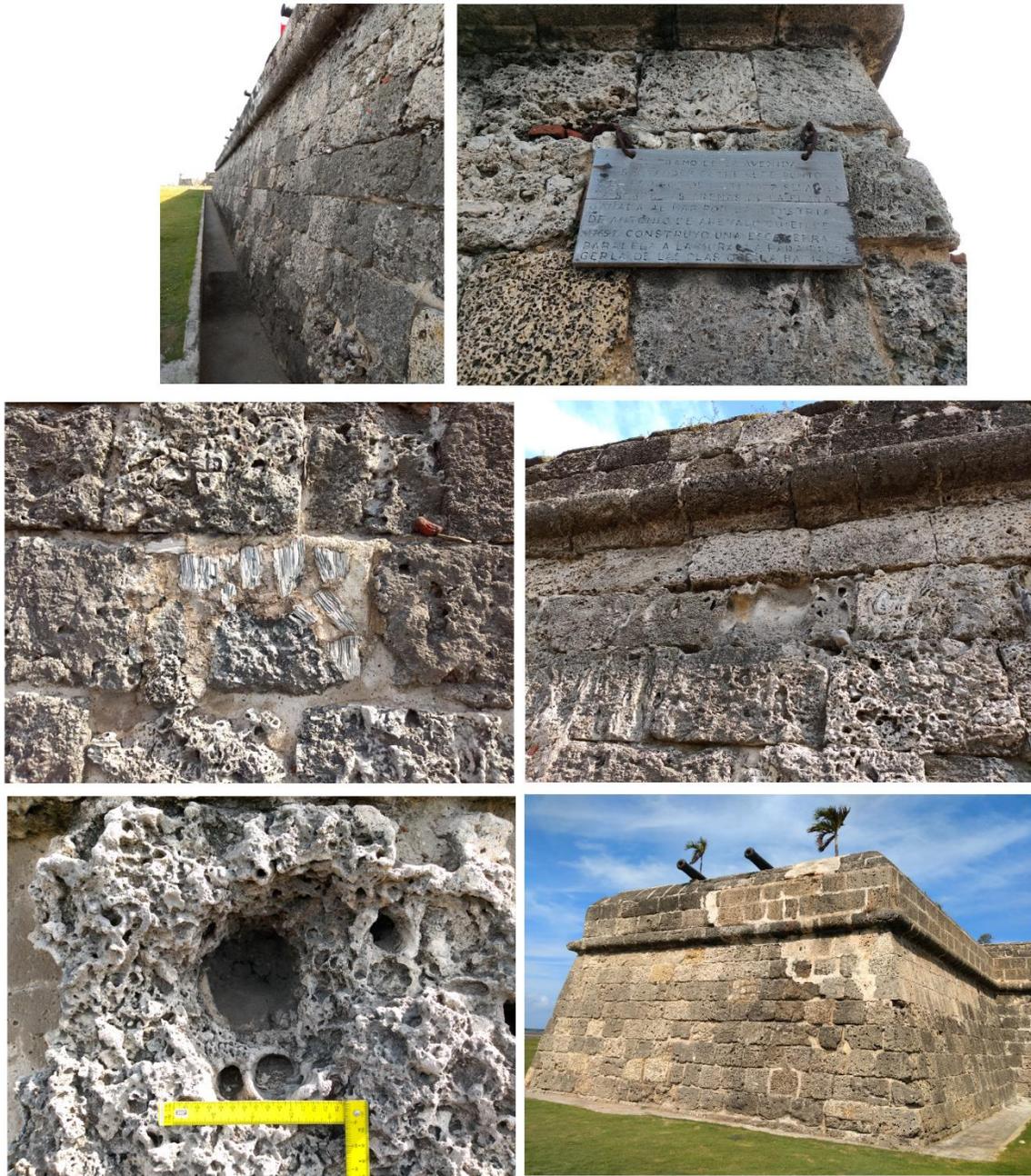
**Figura 13. Estado actual parte alta del Baluarte de Santo Domingo. Fuente: Autores.**



**Figura 14. Estado general de algunos elementos de la parte alta del Baluarte de Santo Domingo.  
Fuente: Autores.**



**Figura 15. Identificación de basura y vegetación en algunos elementos en la parte alta del Baluarte de Santo Domingo. Fuente: Autores.**



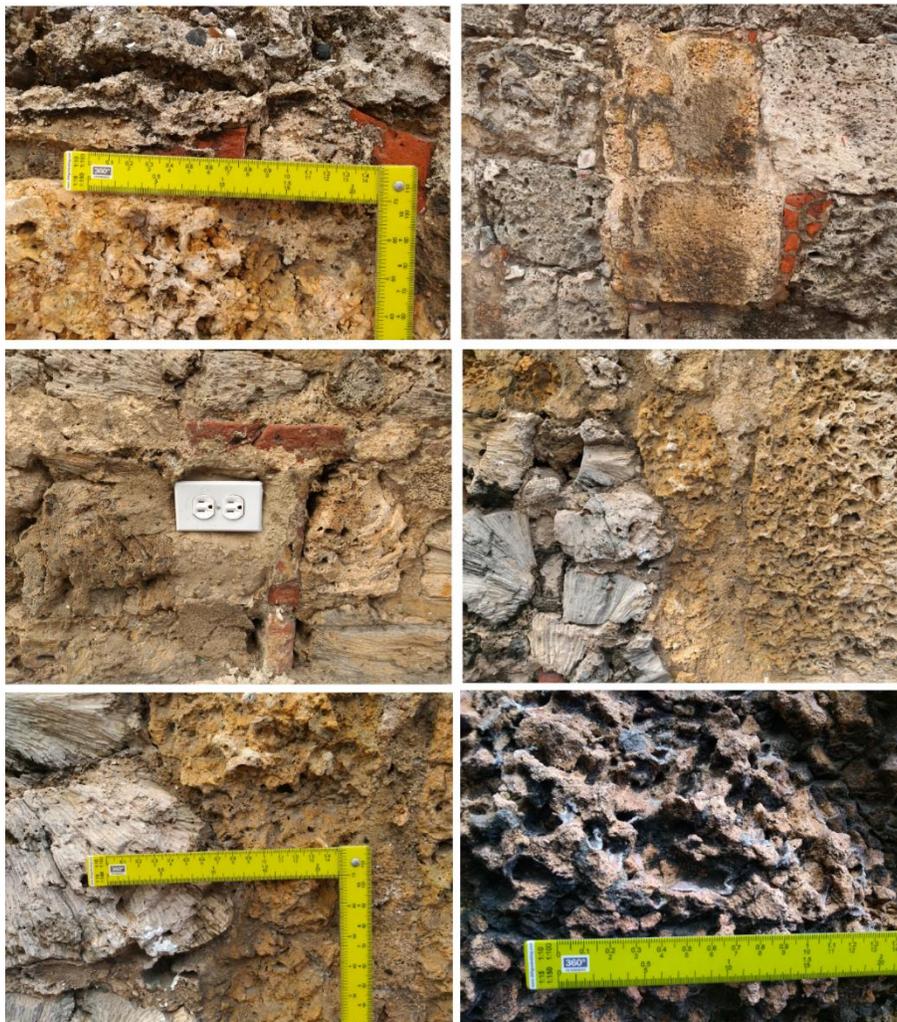
**Figura 16. Estado general de la Escarpa en el tramo de muralla que corresponde al Baluarte de Santo Domingo. Fuente: Autores.**



**Figura 17. Estado general en la zona de la rampa de acceso al Baluarte de Santo Domingo. Fuente: Autores.**



**Figura 18.** Algunos registros de juntas entre elementos que constituyen la rampa de acceso al Baluarte Santo Domingo. Fuente: Autores.



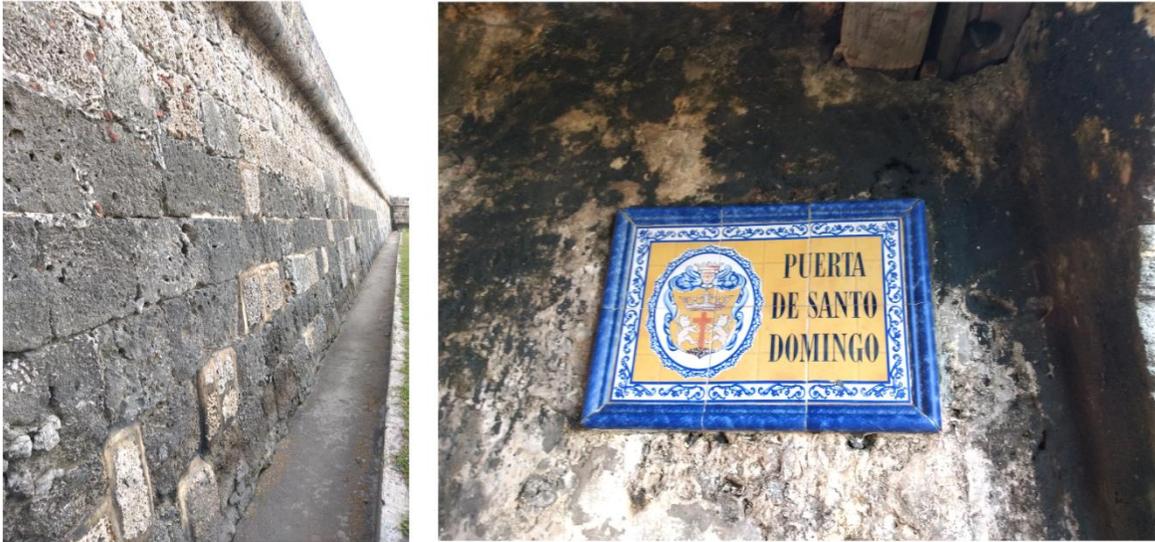
**Figura 19.** Identificación general del estado de algunos elementos e intervenciones en la contraescarpa del tramo de muralla del Baluarte Santo Domingo. Fuente: Autores.



**Figura 20. Algunos elementos y estado general de la contraescarpa de un tramo de muralla aldaño al Baluarte de Santo Domingo. Fuente: Autores.**



**Figura 21. Algunos elementos y estado general de la contraescarpa de un tramo de muralla aledaño al Baluarte de Santo Domingo. Fuente: Autores.**



**Figura 22. Placa y vista general de la escarpa de muralla en un tramo aledaño al Baluarte Santo Domingo. Fuente: Autores.**



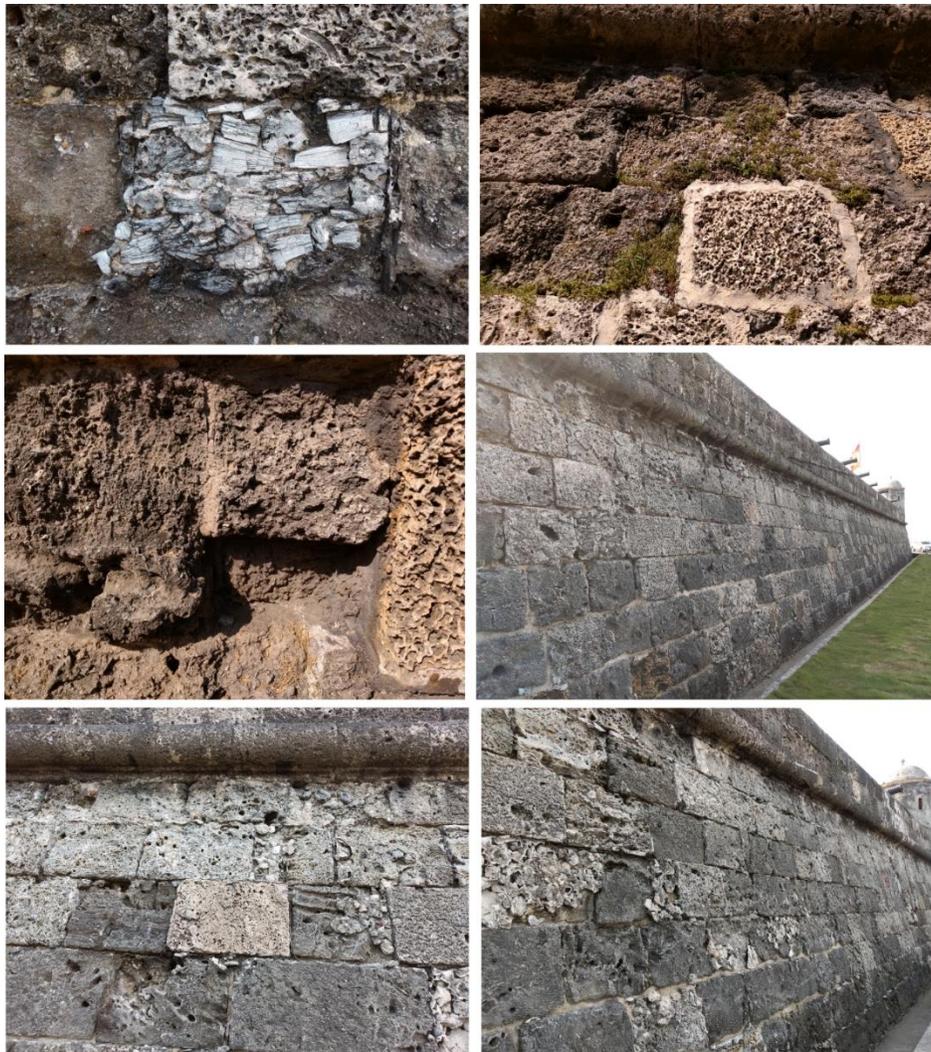
**Figura 23. Vista general del estado en la parte superior del tramo de muralla aledaño al Baluarte de Santo Domingo. Fuente: Autores.**



**Figura 24. Vista general del estado en la parte superior del tramo de muralla entre el Baluarte Santo Domingo y el Baluarte La Santa Cruz. Fuente: Autores.**



**Figura 25. Vista general del estado en contraescarpa del tramo de muralla entre el Baluarte Santo Domingo y el Baluarte La Santa Cruz. Fuente: Autores.**



**Figura 26. Vista general del estado en la escarpa del tramo de muralla entre el Baluarte Santo Domingo y el Baluarte La Santa Cruz. Fuente: Autores.**



**Figura 27. Vista general del estado en la escarpa del tramo de muralla entre el Baluarte Santo Domingo y el Baluarte La Santa Cruz. Fuente: Autores.**

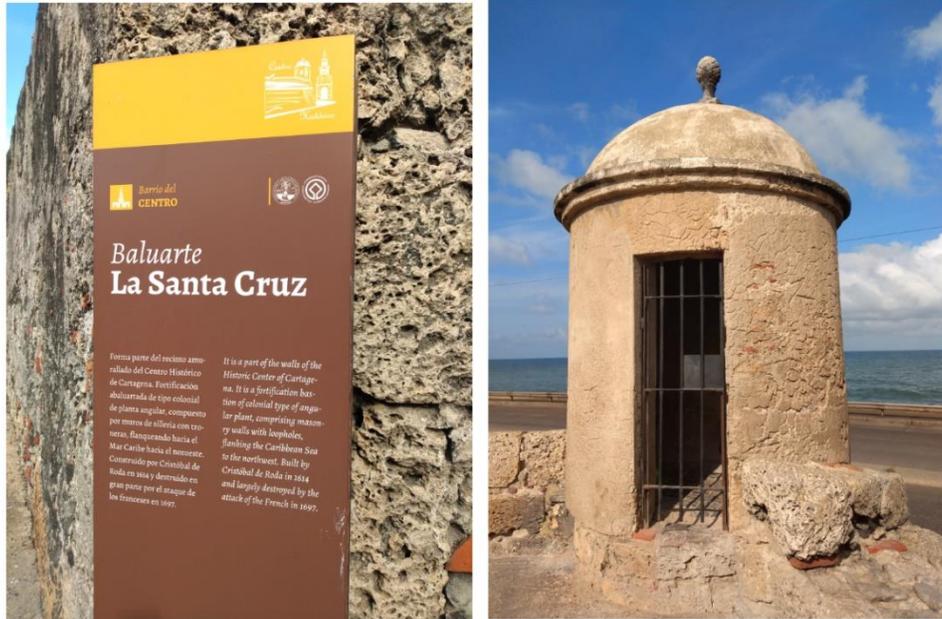
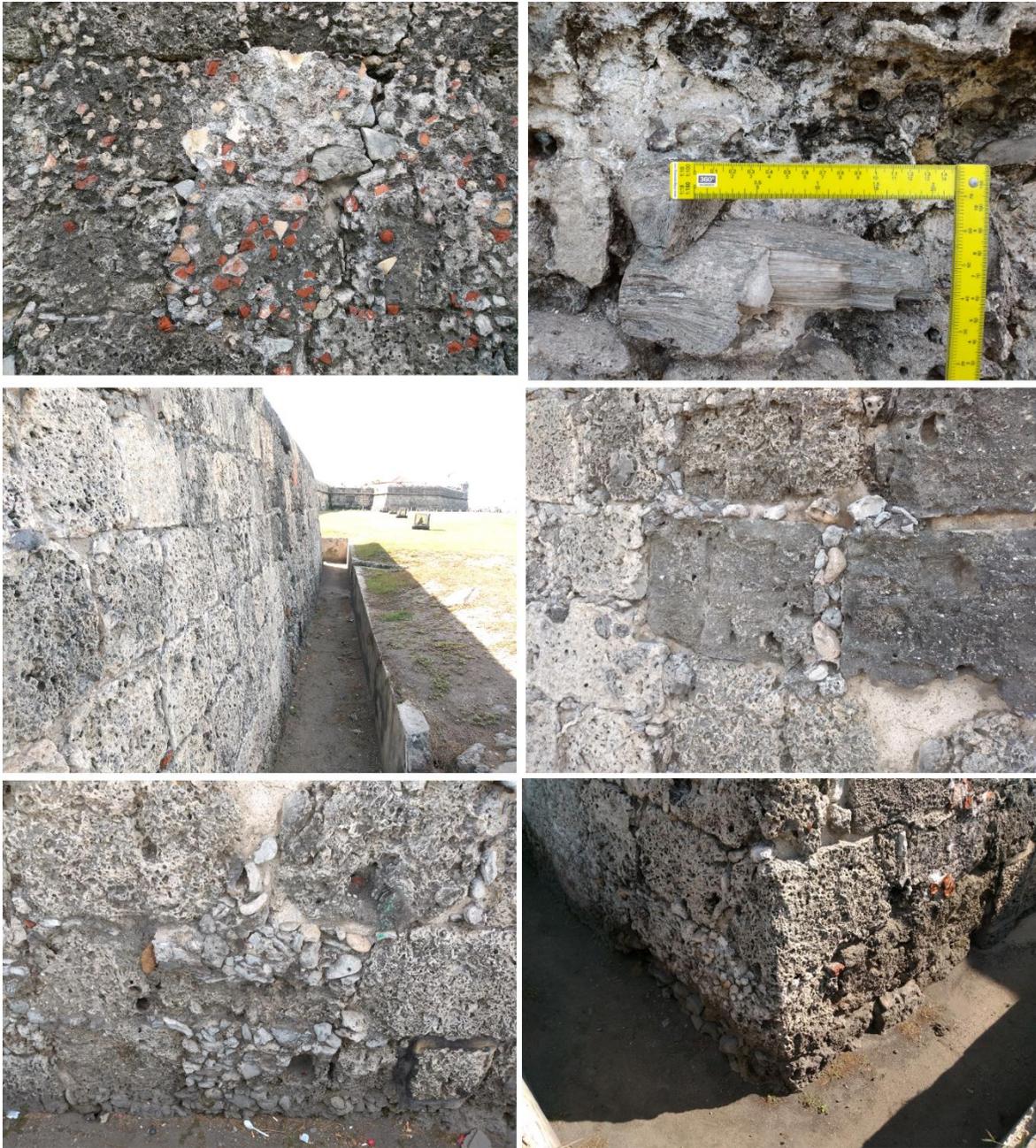


Figura 28. Identificación del Baluarte La Santa Cruz.



Figura 29. Vista y estado general en la parte superior del Baluarte La Santa Cruz. Fuente: Autores.



**Figura 30. Vista y estado general de la contraescarpa en el tramo de muralla del Baluarte La Santa Cruz. Fuente: Autores.**



**Figura 31. Vista general y estado de algunos elementos en el tramo de muralla aledaño al Baluarte La Santa Cruz. Fuente: Autores.**



**Figura 32. Vista y estado general de la escarpa en tramo aledaño al Baluarte La Santa Cruz. Fuente: Autores.**



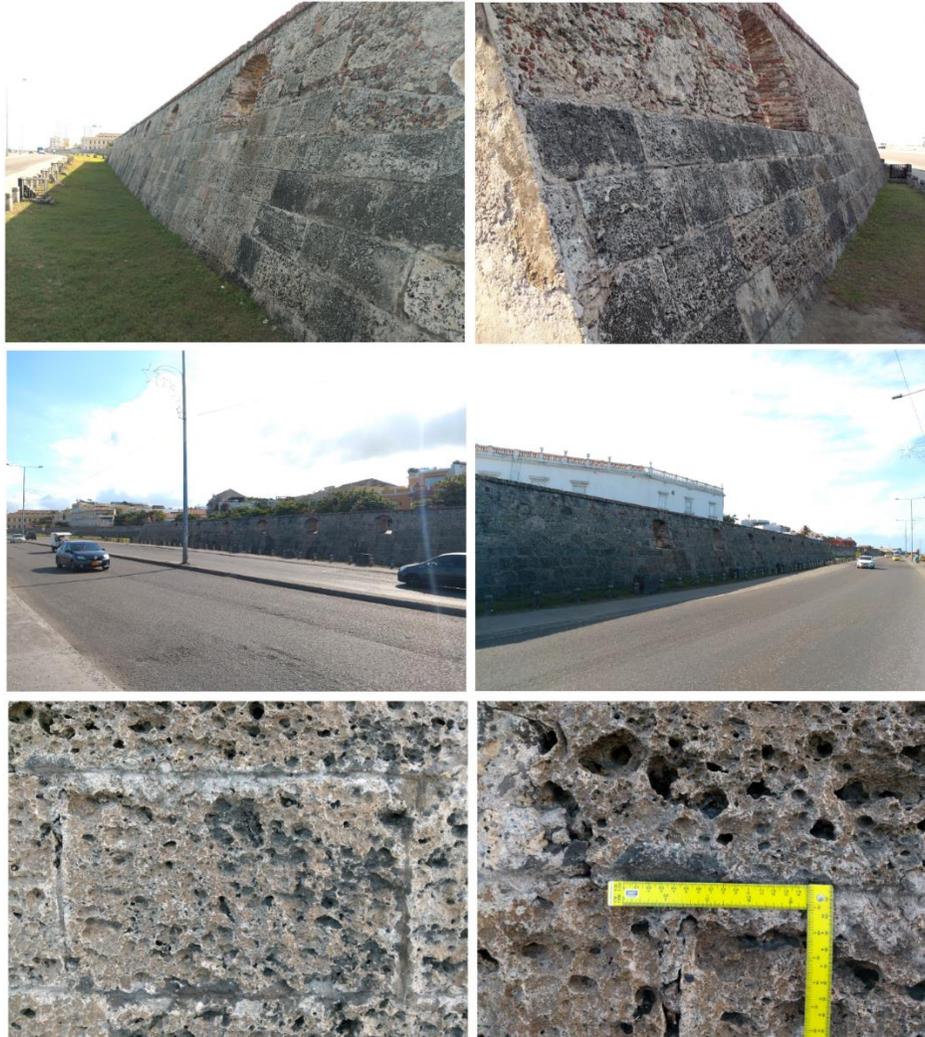
**Figura 33. Vista y estado general de un tramo aledaño al Baluarte La Santa Cruz y donde se identifica la Plataforma de las Ballestas. Fuente: Autores.**



**Figura 34. Identificación y estado general de la escarpa en el tramo de muralla aledaño al Baluarte La Santa Cruz, donde se identifica la Plataforma de Ballestas. Fuente: Autores.**



**Figura 35. Vista y estado general de la contraescarpa en un tramo entre la Plataforma de Ballestas y el Baluarte La Merced. Fuente: Autores.**



**Figura 36. Vista general e identificación de algunos elementos de la escarpa del tramo de muralla entre la Plataforma de Ballestas y el Baluarte La Merced.**



**Figura 37. Identificación del Baluarte La Merced. Fuente: Autores.**



### 3.3. RESUMEN DEL REGISTRO PATOLÓGICO

Se identifican a lo largo del tramo de estudio la escarpa y la contraescarpa de acuerdo a la convención que se muestra en la Figura 38, con puntos de control como se observa en la Figura 39 y que se describen en la Tabla 3.



**Figura 38. Identificación Escarpa (rojo) y Contraescarpa (naranja) del tramo de estudio. Tomado y modificado de Google Earth 2020.**



**Figura 39. Puntos de control referenciados para identificación de patologías. Tomado y modificado de Google Earth 2020.**



**Tabla 3. Resumen puntos de control para el registro patológico. Fuente: Los autores.**

No.	Patología identificada	Ubicación en la estructura	Coord. Norte	Coord. Oeste	Tramo	Monitoreo (Periodicidad-meses)
1	Pérdida de material - Erosión	Escarpa	10°25'26.84"N	75°33'13.59"O	1	6
2	Pérdida de material - Alveolización	Escarpa	10°25'27.17"N	75°33'13.73"O	1	6
3	Decoloración y depósito - Costras negras	Escarpa	10°25'27.26"N	75°33'13.98"O	1	6
4	Colonización biológica - Plantas	Escarpa	10°25'26.73"N	75°33'14.22"O	1	3
5	Pérdida de material - Alveolización	Escarpa	10°25'27.14"N	75°33'14.74"O	1	6
6	Pérdida de material - Erosión	Escarpa	10°25'27.44"N	75°33'15.03"O	1	6
7	Colonización biológica - Plantas	Escarpa	10°25'27.80"N	75°33'15.32"O	1	3
8	Decoloración y depósito - Costras negras	Escarpa	10°25'28.28"N	75°33'15.50"O	1	6
9	Pérdida de material - Alveolización	Escarpa	10°25'28.54"N	75°33'15.29"O	1	6
10	Pérdida de material - Erosión	Escarpa	10°25'29.51"N	75°33'14.43"O	1	6
11	Colonización biológica - Musgos	Escarpa	10°25'29.17"N	75°33'14.17"O	1	3
12	Pérdida de material - Alveolización	Escarpa	10°25'28.94"N	75°33'13.87"O	1	6
13	Decoloración y depósito - Costras negras	Escarpa	10°25'30.05"N	75°33'13.36"O	2	6
14	Pérdida de material - Alveolización	Escarpa	10°25'31.62"N	75°33'12.92"O	2	6
15	Pérdida de material - Alveolización	Escarpa	10°25'32.07"N	75°33'12.73"O	2	6
16	Pérdida de material - Alveolización	Escarpa	10°25'32.20"N	75°33'11.71"O	2	6
17	Pérdida de material - Alveolización	Escarpa	10°25'32.43"N	75°33'10.97"O	2	6
18	Decoloración y depósito - Manchas	Escarpa	10°25'33.24"N	75°33'9.95"O	3	6
19	Decoloración y depósito - Manchas	Escarpa	10°25'34.37"N	75°33'8.95"O	3	6
20	Pérdida de material - Alveolización	Escarpa	10°25'35.20"N	75°33'7.92"O	3	6



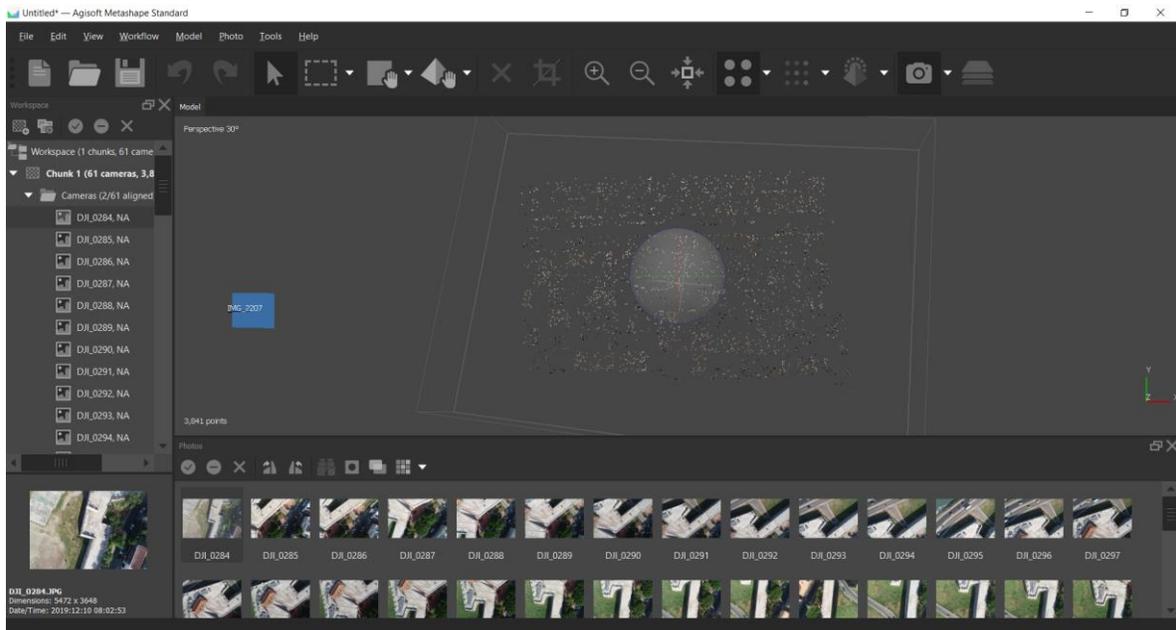
Continuación Tabla 3. Fuente: Los Autores.

No.	Patología identificada	Ubicación en la estructura	Coord. Norte	Coord. Oeste	Tramo	Monitoreo (Periodicidad-meses)
21	Decoloración y depósito - Manchas	Escarpa	10°25'35.49"N	75°33'7.31"O	4	6
22	Pérdida de material - Alveolización	Escarpa	10°25'35.88"N	75°33'6.69"O	4	6
23	Pérdida de material - Alveolización	Escarpa	10°25'36.35"N	75°33'5.99"O	4	6
24	Pérdida de material - Alveolización	Contraescarpa	10°25'35.58"N	75°33'6.86"O	4	6
25	Pérdida de material - Alveolización	Contraescarpa	10°25'34.61"N	75°33'8.42"O	3	6
26	Pérdida de material - Alveolización	Contraescarpa	10°25'33.61"N	75°33'9.36"O	3	6
27	Pérdida de material - Alveolización	Contraescarpa	10°25'32.67"N	75°33'10.32"O	3	6
28	Pérdida de material - Alveolización	Contraescarpa	10°25'31.88"N	75°33'11.24"O	2	6
29	Pérdida de material - Alveolización	Contraescarpa	10°25'31.52"N	75°33'12.19"O	2	6
30	Decoloración y depósito - Costras negras	Contraescarpa	10°25'31.59"N	75°33'12.54"O	2	6
31	Decoloración y depósito - Costras negras	Contraescarpa	10°25'30.41"N	75°33'12.68"O	2	6
32	Pérdida de material - Alveolización	Contraescarpa	10°25'29.84"N	75°33'12.96"O	2	6
33	Decoloración y depósito - Costras negras	Contraescarpa	10°25'28.77"N	75°33'13.40"O	1	6
34	Decoloración y depósito - Costras negras	Contraescarpa	10°25'28.21"N	75°33'13.97"O	1	6
35	Pérdida de material - Alveolización	Contraescarpa	10°25'28.06"N	75°33'13.70"O	1	6
36	Decoloración y depósito - Costras negras	Contraescarpa	10°25'27.74"N	75°33'13.51"O	1	6
37	Colonización biológica - Musgos	Contraescarpa	10°25'27.51"N	75°33'13.36"O	1	3
38	Colonización biológica - Plantas	Contraescarpa	10°25'27.24"N	75°33'13.25"O	1	3

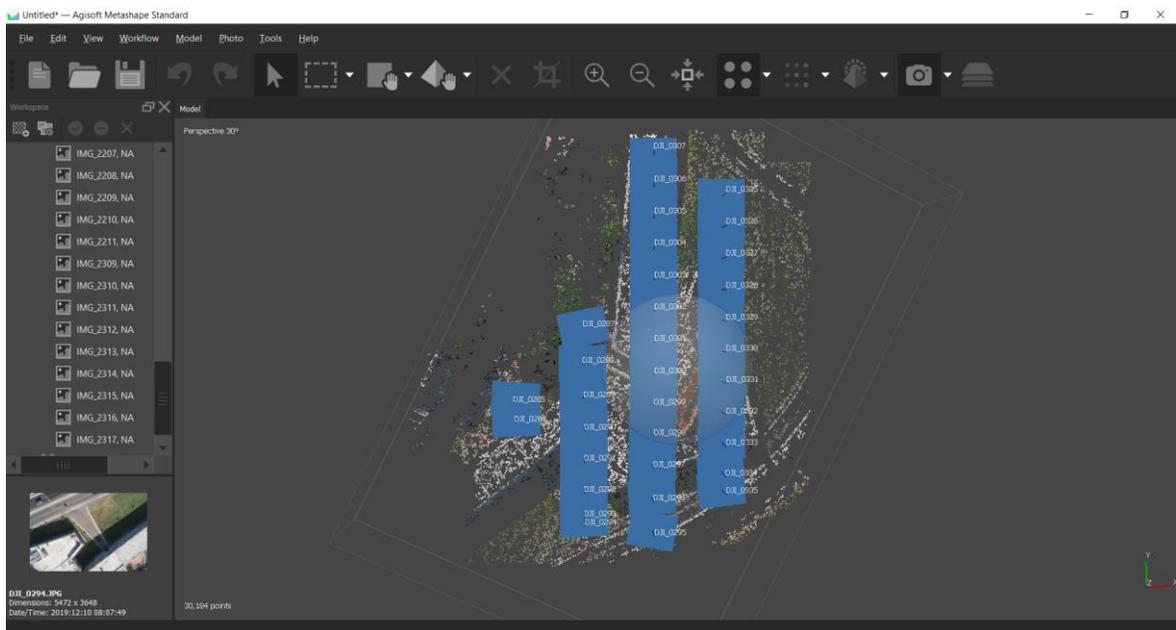
Entre la Figura 46 y la Figura 73 se muestra el registro fotográfico correspondiente así como su relación con el modelo construido.

### 3.4. TERCERA FASE: REALIZACIÓN DEL MODELO EN 3D

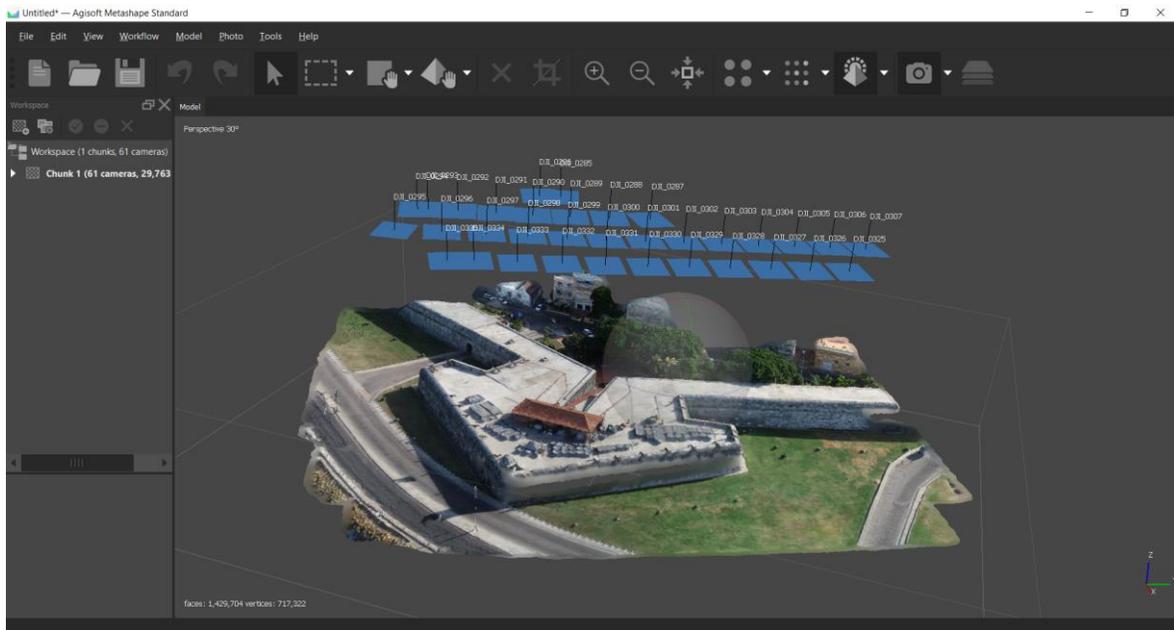
Para la realización del modelo en 3D se han tomado los datos geométricos que ofrece la recolección de información fotográfica descrita en el proceso metodológico.



**Figura 40. Carga de fotos al programa Agisoft para generación de imagen 3D. Fuente: Autores.**



**Figura 41. Organización secuencial de las imágenes en Agisoft. Fuente: Autores.**



**Figura 42. Resultados de generación de imagen 3D a través de Agisoft, base para la generación del modelo. Fuente: Autores.**

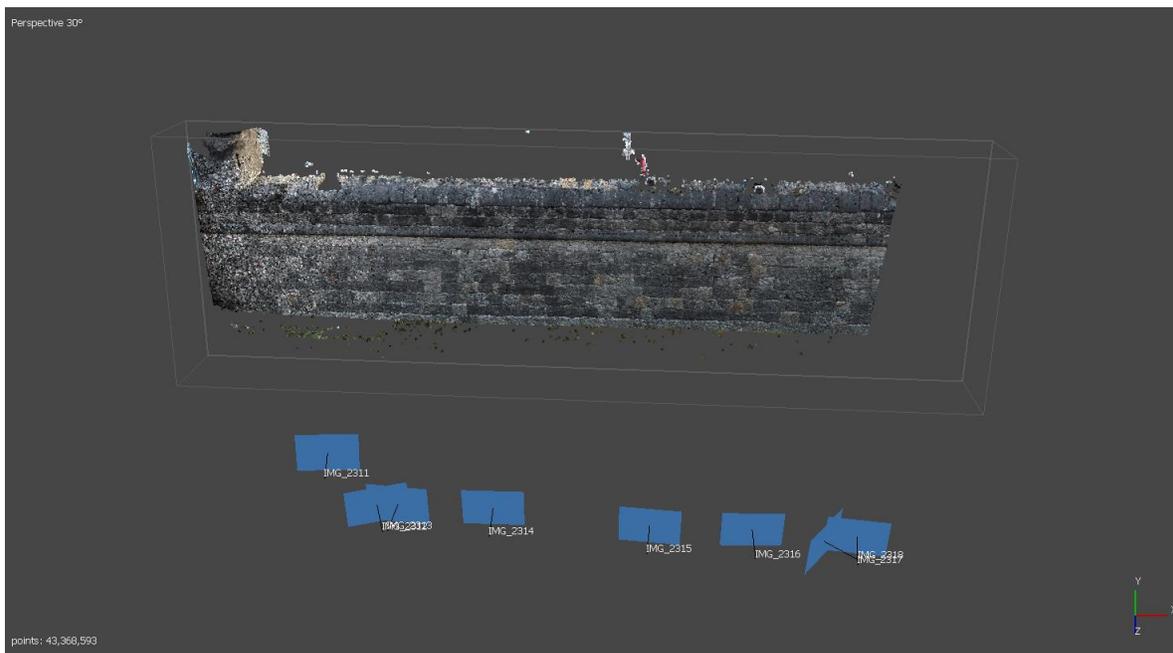
Para la edición final del modelo, que es el proceso en que se encuentra el proyecto, ha sido necesario el estudio y análisis de la información recopilada, el ajuste de ubicación de fotografías, corrida sucesiva del programa que genera la imagen en 3D, el cual toma tiempo de acuerdo a la cantidad de información que le suministre, así como se mostró en las imágenes anteriores.

A través del procesamiento de la información obtenida de los sobrevuelos con dron así como de los datos recopilados en los recorridos de campo, se logró modelar en Revit la geometría del tramo de estudio, para luego incluir en las secciones definidas por el grupo de trabajo las patologías identificadas. Es importante anotar que el tiempo de procesamiento de máquina, tiempo que el software Agisoft en este caso se tomaba para procesar la información para generar la nube de puntos, la cual se desarrolla en dos etapas, obteniendo primero una nube que identifica los puntos en común de las fotos analizadas para luego conformar una nube de puntos dispersa que contiene una mayor densidad de puntos, era de hasta seis (6) horas para grupos de 25 fotografías, lo que podía extenderse mucho más al momento de densificar dicha nube de puntos.

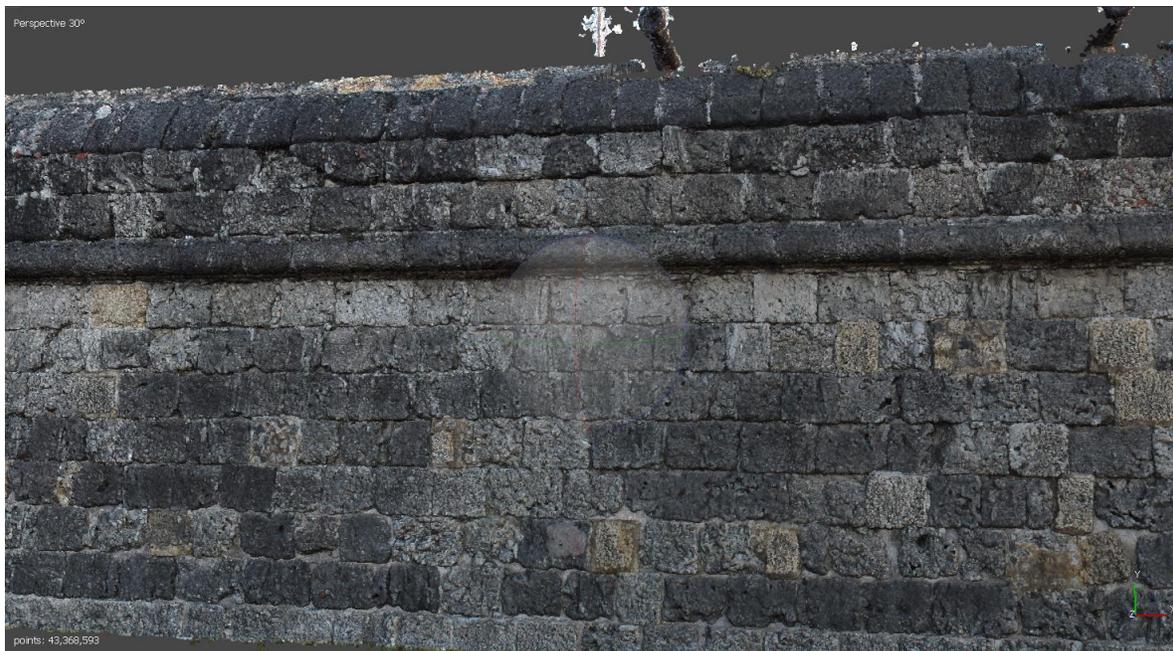
Como se muestra en la Figura 43 con el Agisoft para un solo tramo de la escarpa del Baluarte de Santo Domingo se pueden generar más de cuarenta y tres millones de puntos, los cuales



logran el detalle que se muestra en la Figura 44, pero que requieren elevados tiempos de procesamiento.



**Figura 43. Obtención de nube de puntos en Agisoft de un tramo de la escarpa del Baluarte de Santo Domingo. Fuente: Autores.**



**Figura 44. Detalle de la nube de puntos obtenida de Agisoft para un tramo de la escarpa del Baluarte de Santo Domingo. Fuente: Autores.**

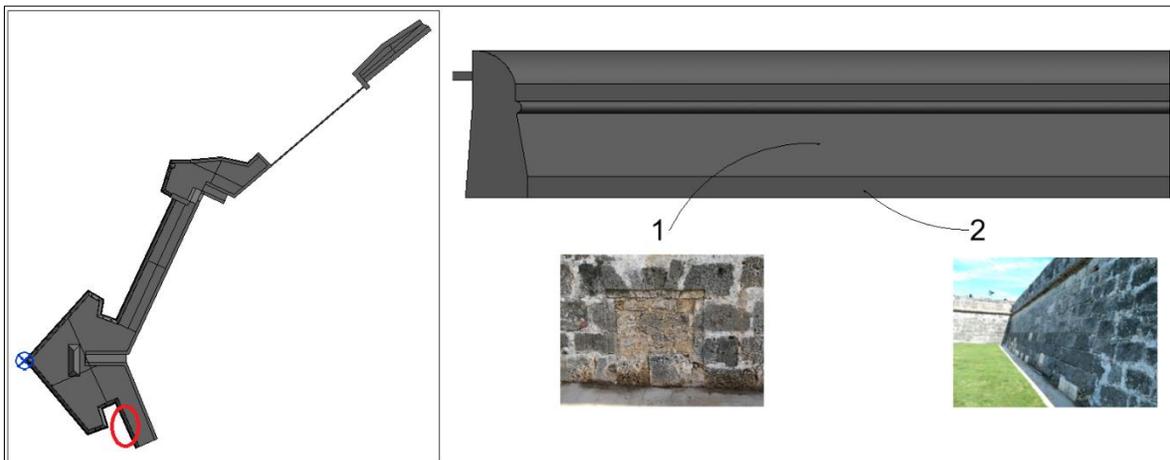
A esta etapa de procesamiento se le suma el tiempo que tarda en procesar ahora el archivo de nube de puntos para lograr conformar el modelo en Revit, con la calidad de detalle que se muestra esquemáticamente en la Figura 45.



**Figura 45. Modelo resultado del manejo de la nube de puntos en Revit. Fuente: Autores.**

### 3.5. RESULTADOS

A continuación, se muestra en planta (izquierda) la ubicación de las patologías que en corte (derecha) se identificaron en el tramo de estudio. La ubicación y descripción de las patologías obedece a la organización propuesta en la Tabla 3. Es importante aclarar que se reporta la información ya unificada en el modelo de Revit.



1	Pérdida de material - Erosión	10°25'26.84"N	75°33'13.59"O
2	Pérdida de material - Alveolización	10°25'27.17"N	75°33'13.73"O

**Figura 46. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 1 y 2). Fuente:**



Autores.

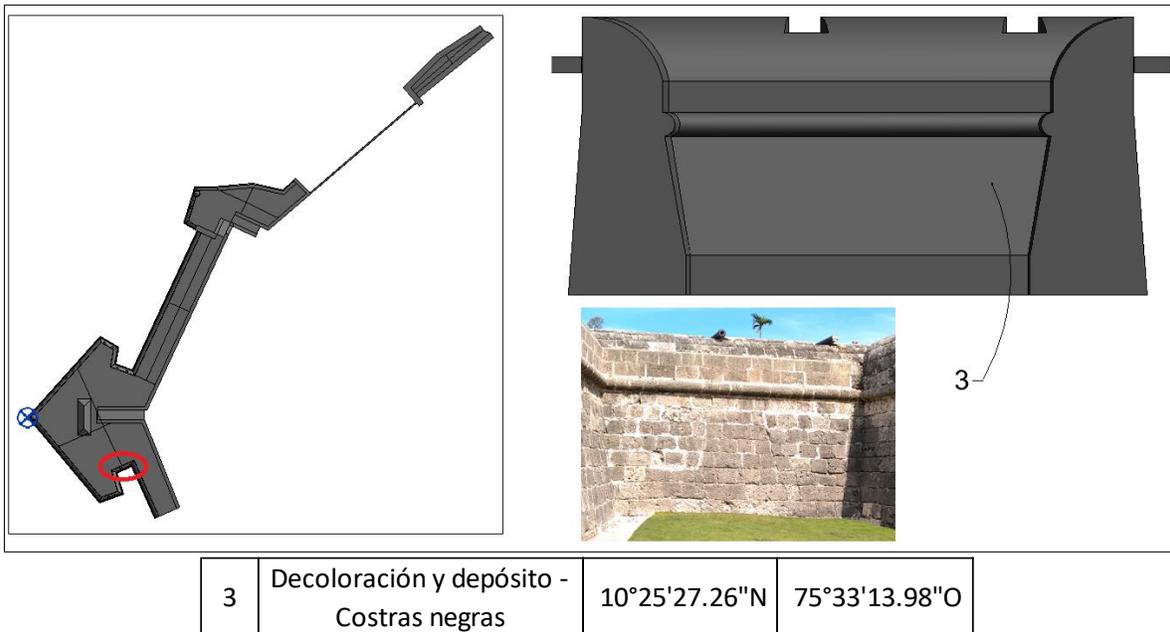


Figura 47. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 3). Fuente: Autores.

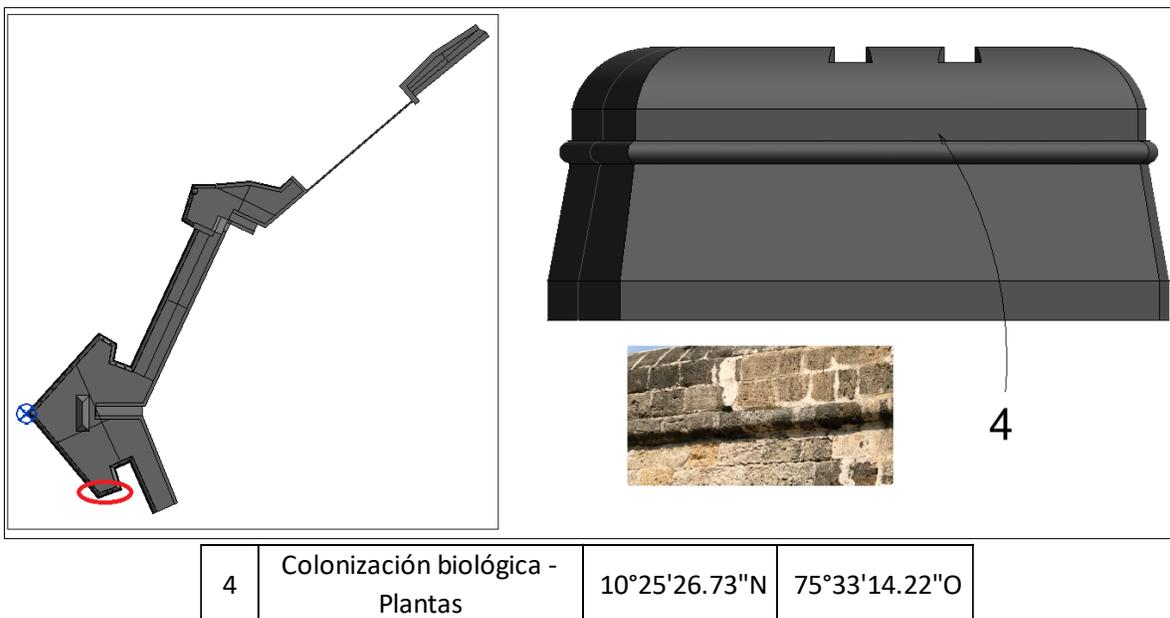


Figura 48. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 4). Fuente: Autores.

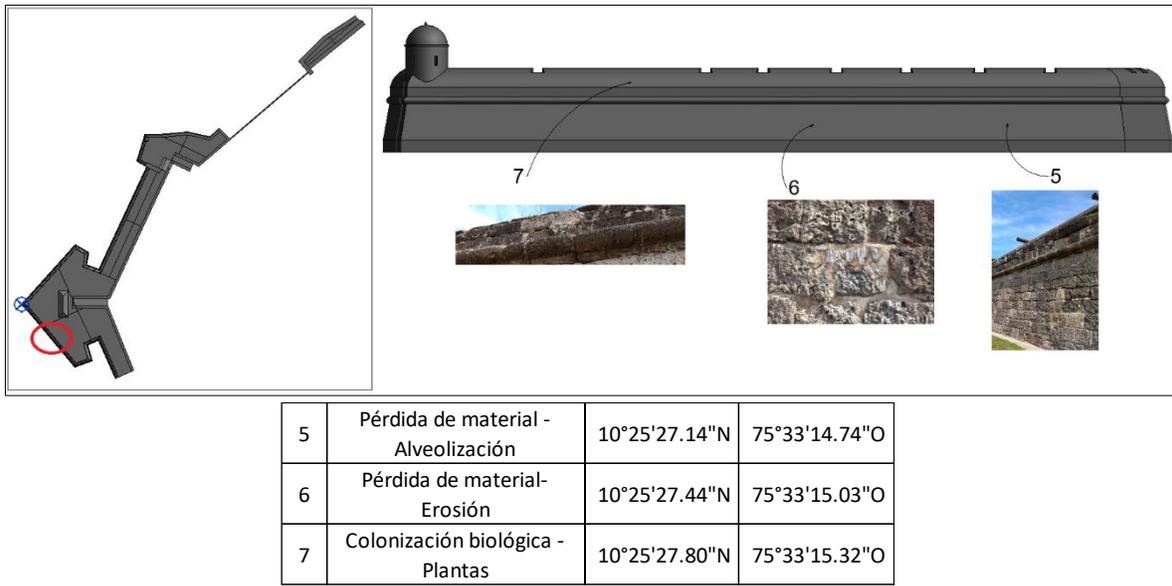


Figura 49. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 5, 6 y 7). Fuente: Autores.

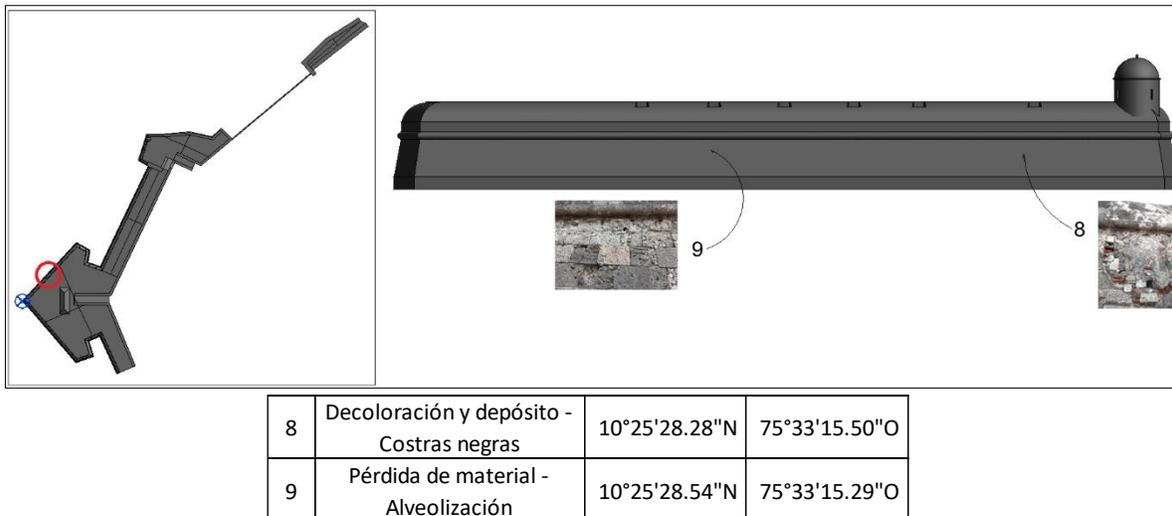
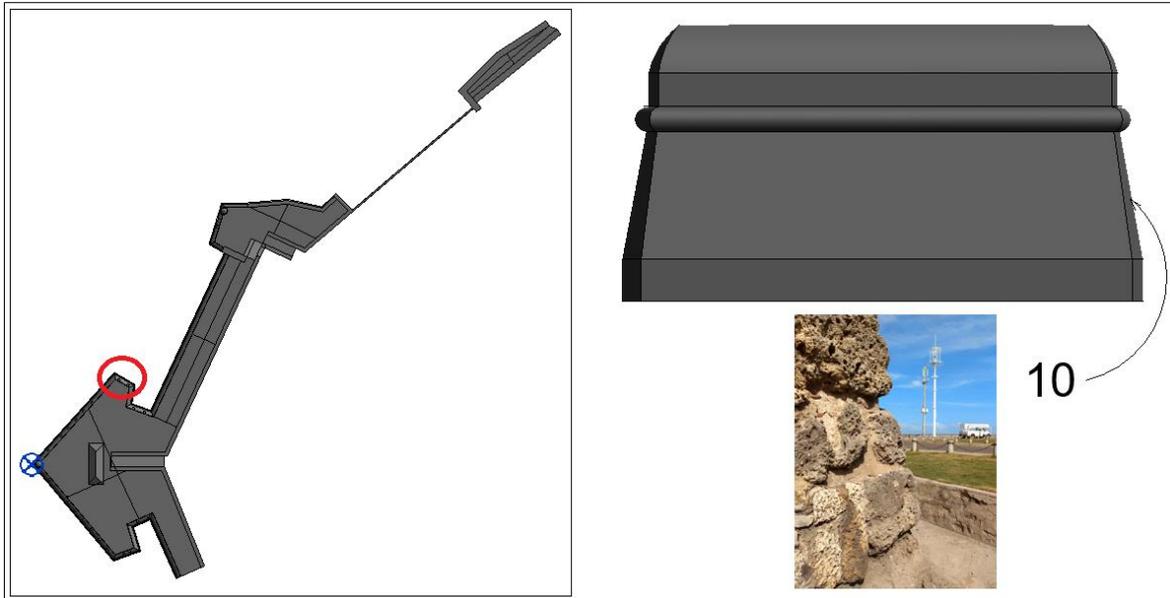
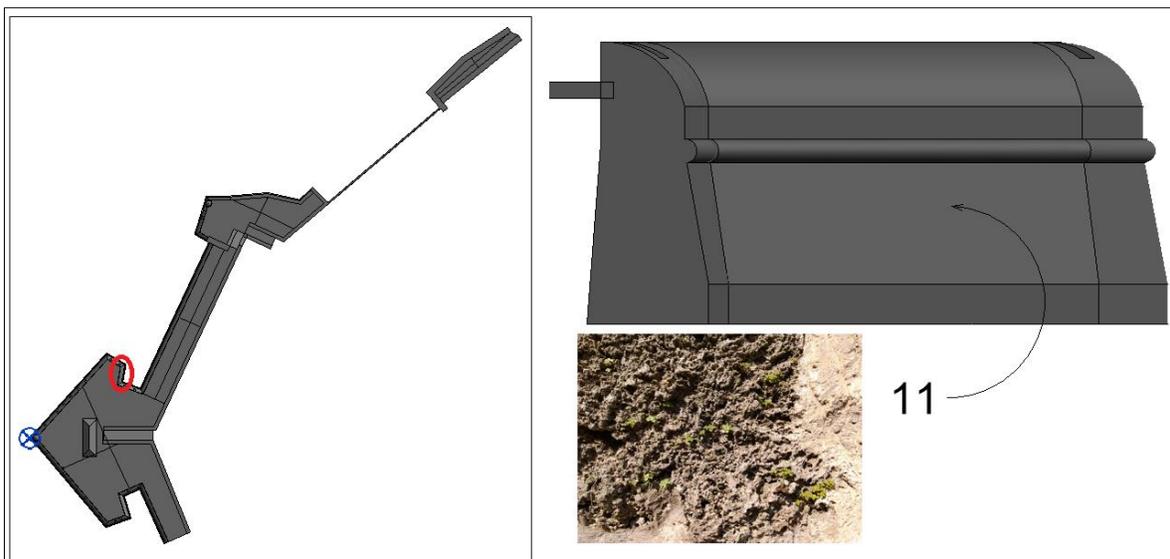


Figura 50. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 8 y 9). Fuente: Autores.



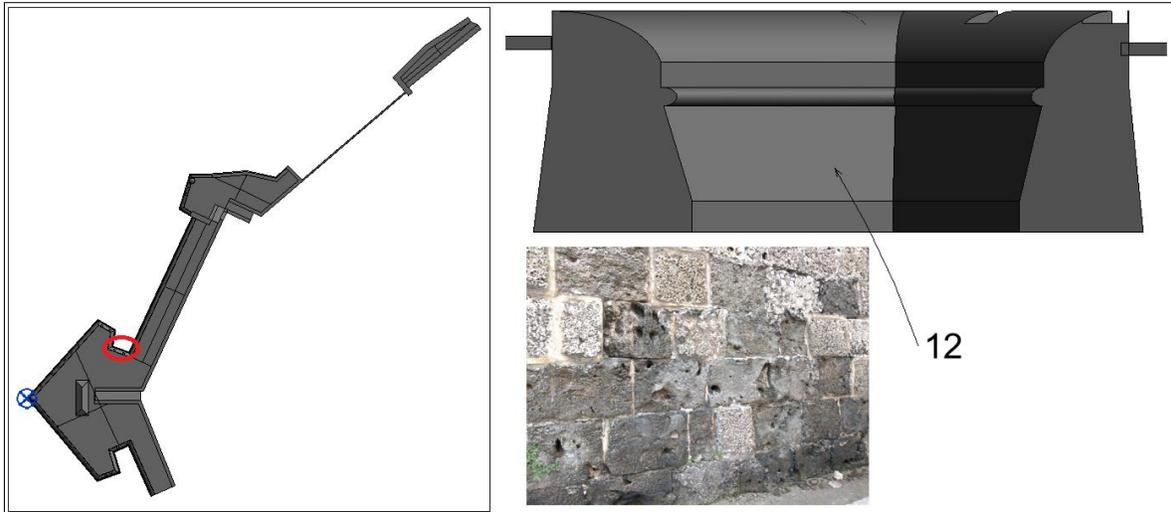
10	Pérdida de material - Erosión	10°25'29.51"N	75°33'14.43"O
----	-------------------------------	---------------	---------------

Figura 51. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 10). Fuente: Autores.



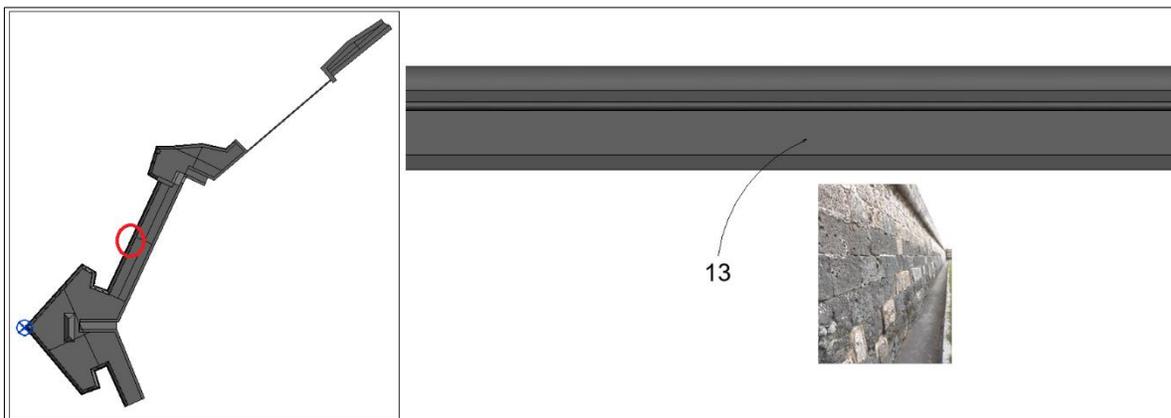
11	Colonización biológica - Musgos	10°25'29.17"N	75°33'14.17"O
----	---------------------------------	---------------	---------------

Figura 52. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 11). Fuente: Autores.



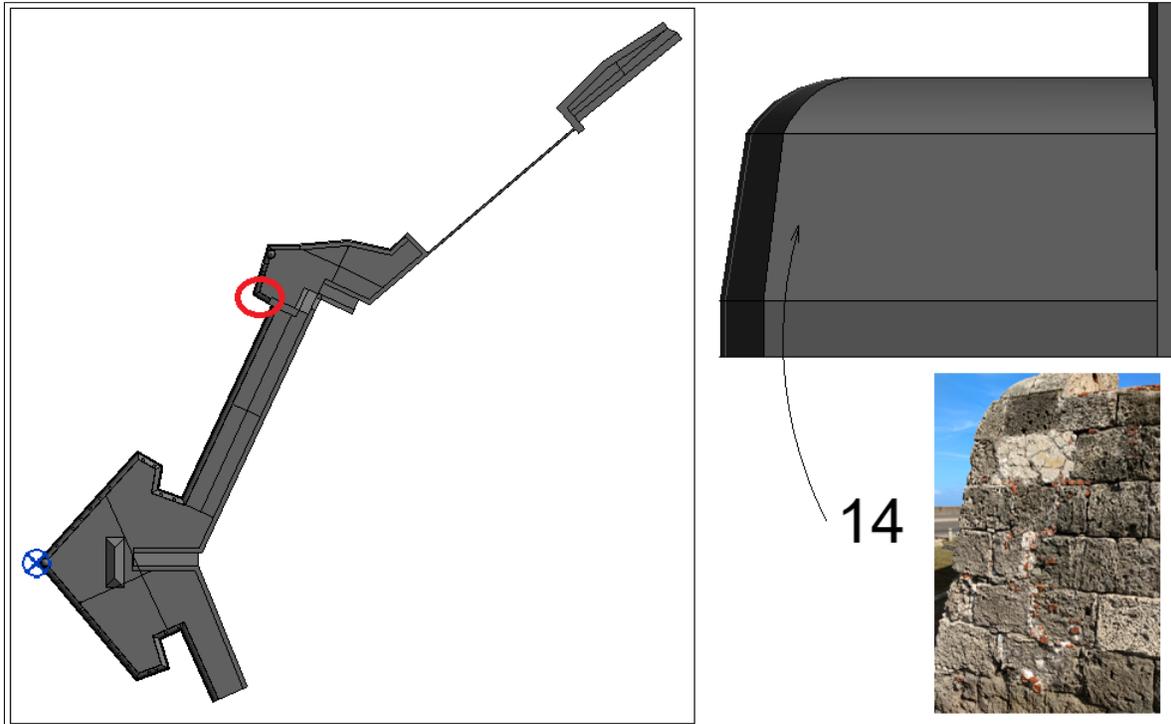
12	Pérdida de material - Alveolización	10°25'28.94"N	75°33'13.87"O
----	--	---------------	---------------

**Figura 53. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 12). Fuente: Autores.**



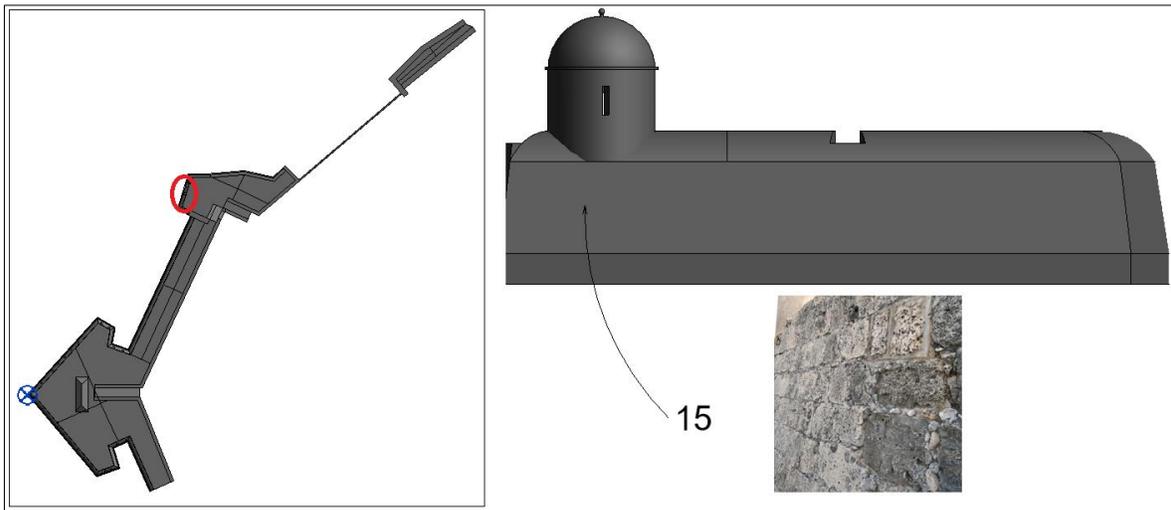
13	Decoloración y depósito - Costras negras	10°25'30.05"N	75°33'13.36"O
----	---	---------------	---------------

**Figura 54. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 13). Fuente: Autores.**



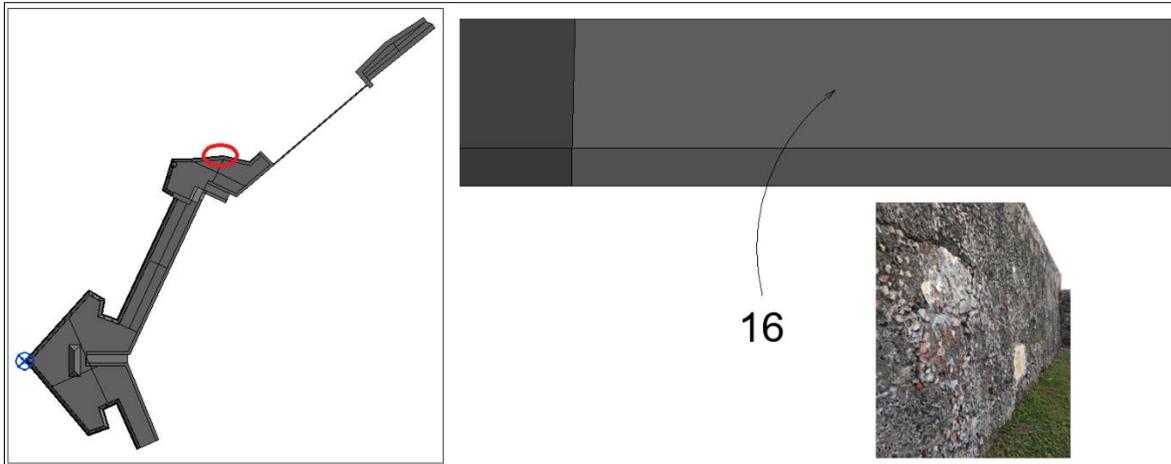
14	Pérdida de material - Alveolización	10°25'31.62"N	75°33'12.92"O
----	--	---------------	---------------

Figura 55. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 14). Fuente: Autores.



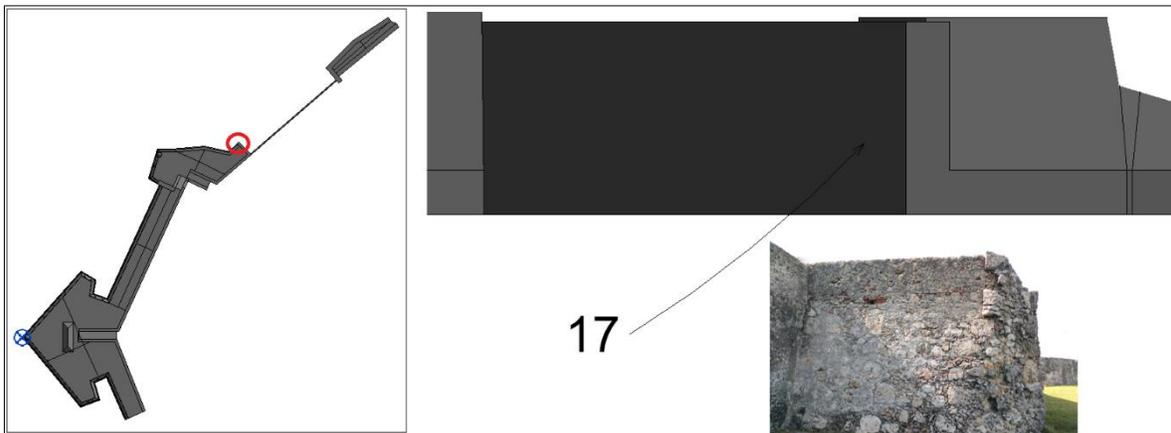
15	Pérdida de material - Alveolización	10°25'32.07"N	75°33'12.73"O
----	--	---------------	---------------

Figura 56. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 15). Fuente: Autores.



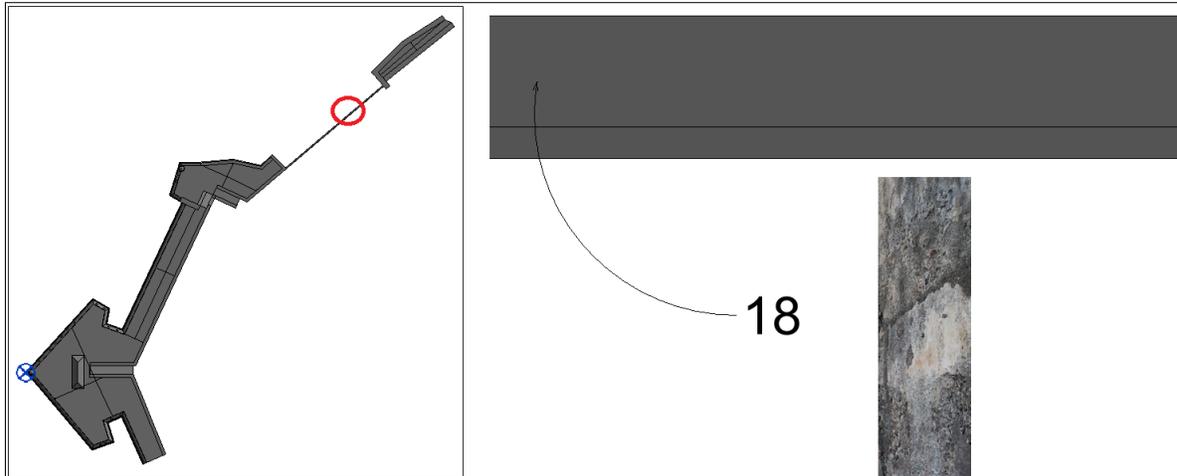
16	Pérdida de material - Alveolización	10°25'32.20"N	75°33'11.71"O
----	-------------------------------------	---------------	---------------

Figura 57. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 16). Fuente: Autores.



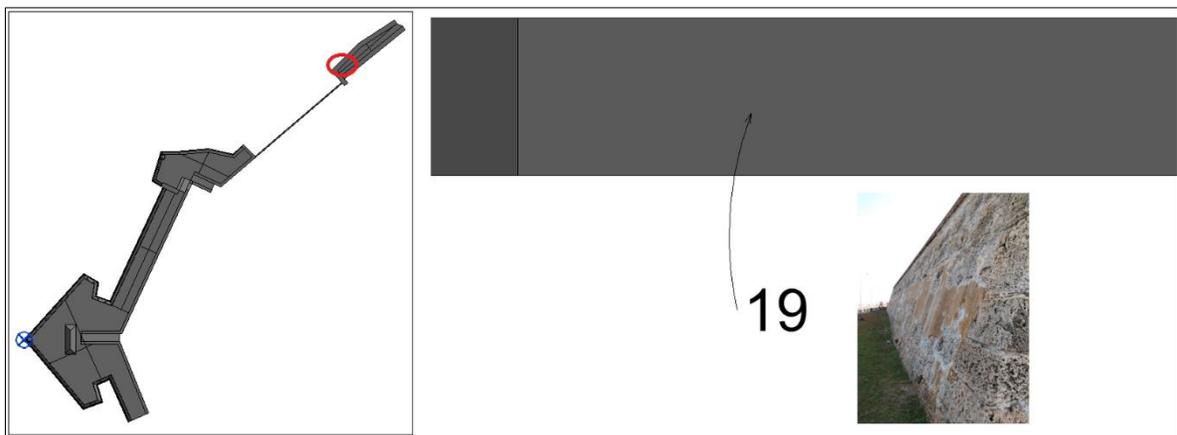
17	Pérdida de material - Alveolización	10°25'32.43"N	75°33'10.97"O
----	-------------------------------------	---------------	---------------

Figura 58. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 17). Fuente: Autores.



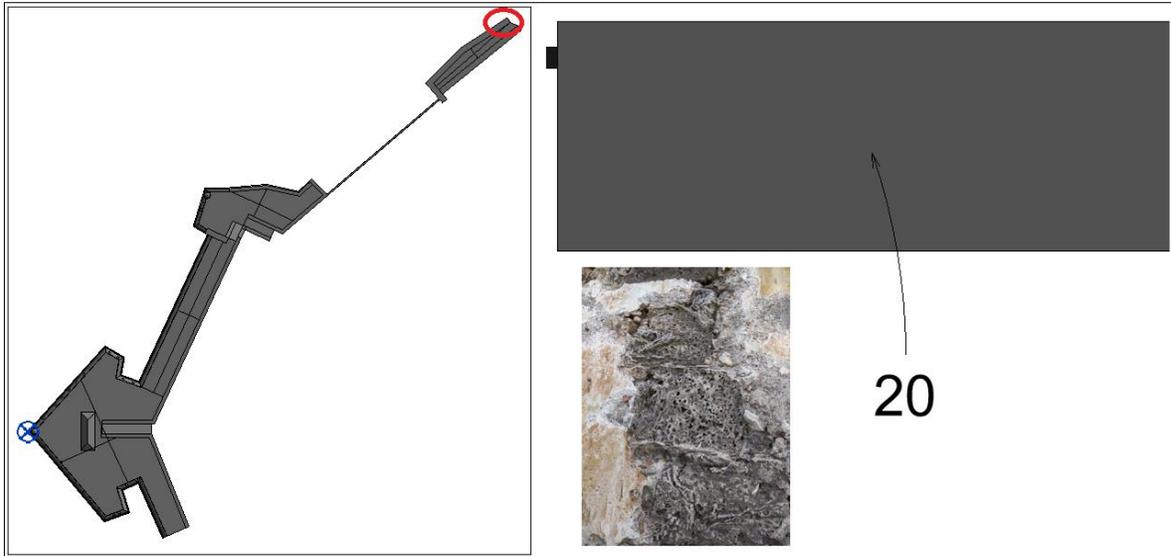
18	Decoloración y depósito - Manchas	10°25'33.24"N	75°33'9.95"O
----	--------------------------------------	---------------	--------------

**Figura 59. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 18). Fuente: Autores.**



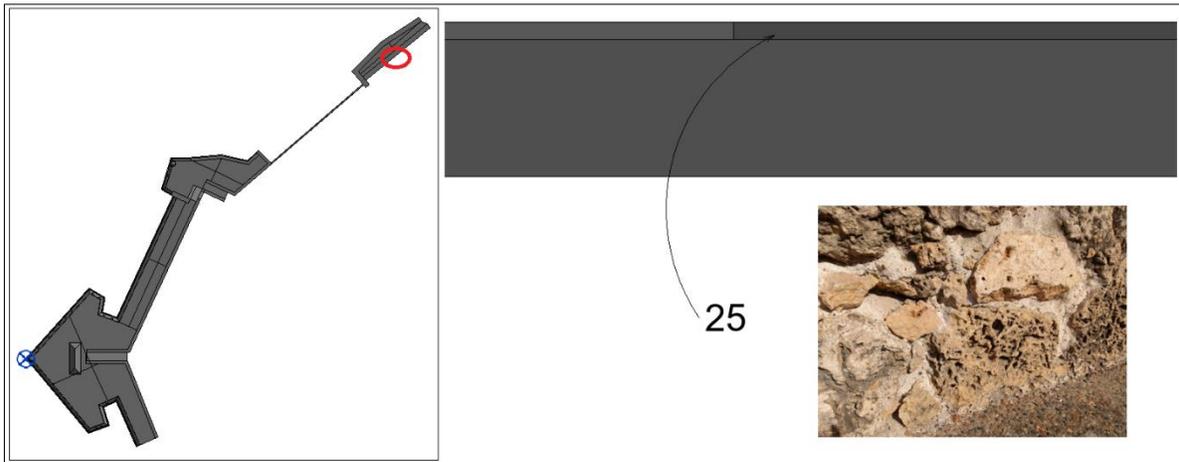
19	Decoloración y depósito - Manchas	10°25'34.37"N	75°33'8.95"O
----	--------------------------------------	---------------	--------------

**Figura 60. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 19). Fuente: Autores.**



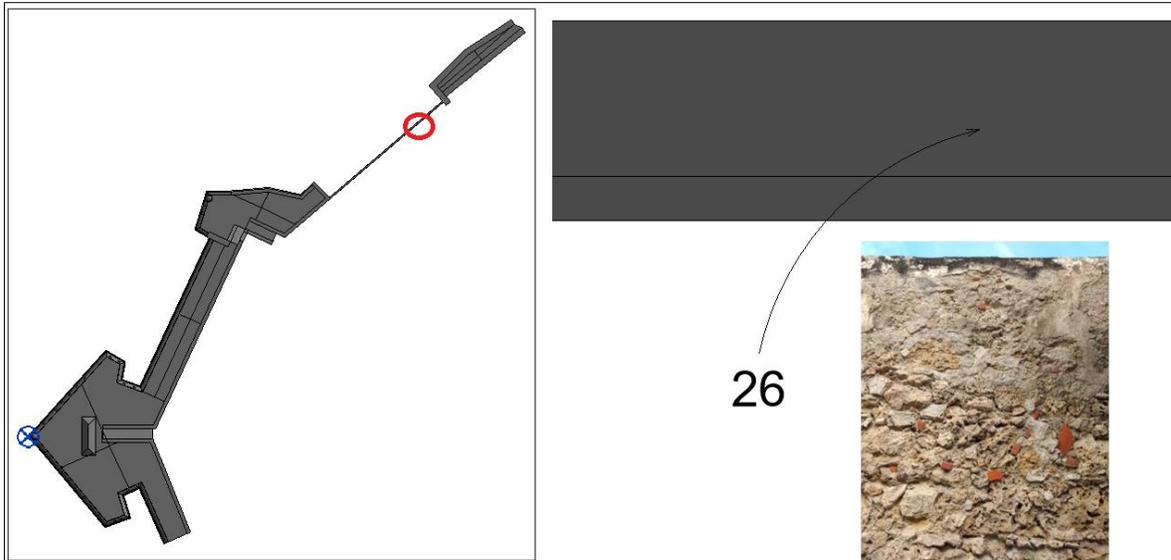
20	Pérdida de material - Alveolización	10°25'35.20"N	75°33'7.92"O
----	--	---------------	--------------

**Figura 61. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 20). Fuente: Autores.**



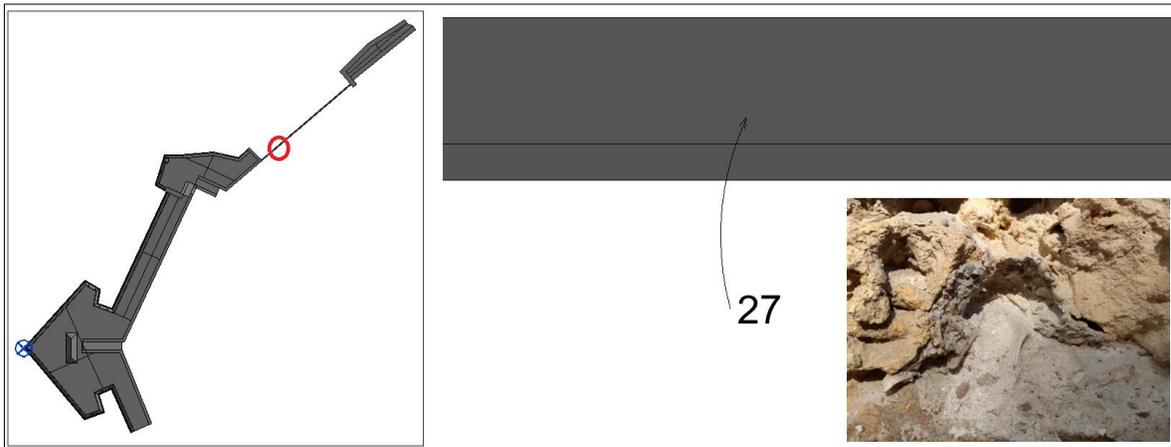
25	Pérdida de material - Alveolización	10°25'34.61"N	75°33'8.42"O
----	--	---------------	--------------

**Figura 62. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 25). Fuente: Autores.**



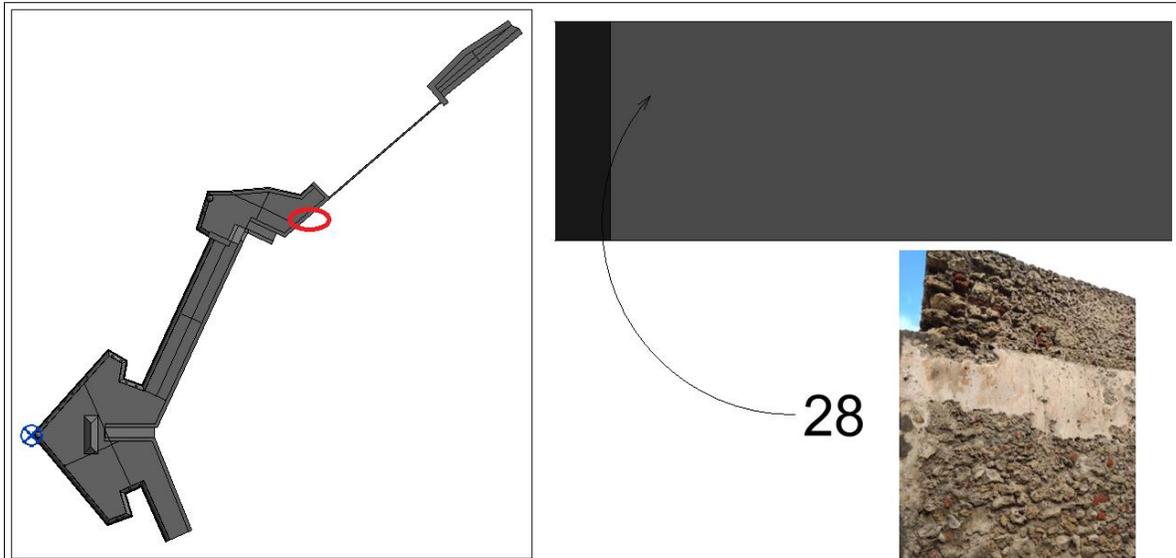
26	Pérdida de material - Alveolización	10°25'33.61"N	75°33'9.36"O
----	--	---------------	--------------

Figura 63. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 26). Fuente: Autores.



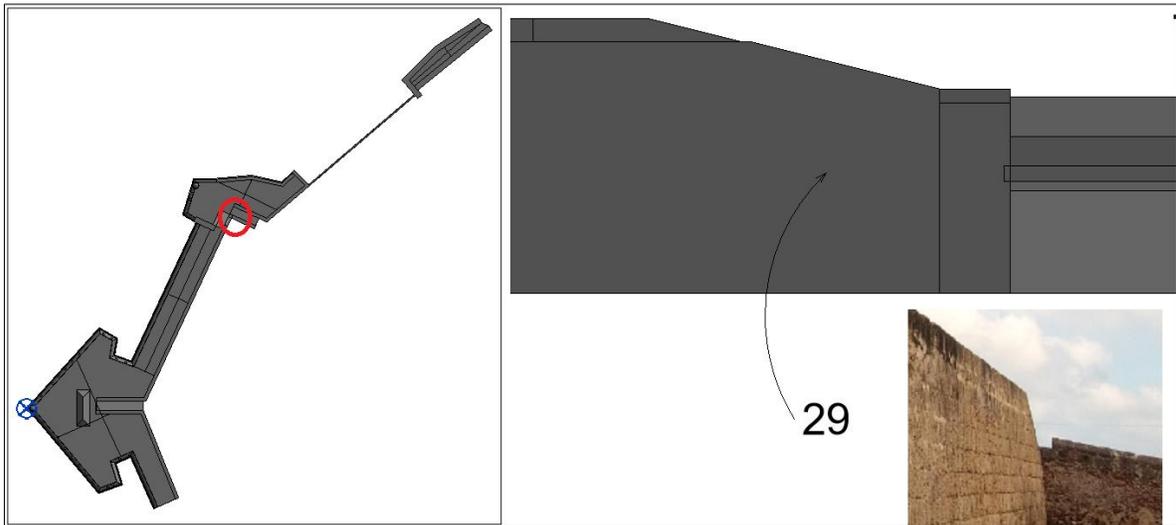
27	Pérdida de material - Alveolización	10°25'32.67"N	75°33'10.32"O
----	--	---------------	---------------

Figura 64. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 27). Fuente: Autores.



28	Pérdida de material - Alveolización	10°25'31.88"N	75°33'11.24"O
----	--	---------------	---------------

Figura 65. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 28). Fuente: Autores.



29	Pérdida de material - Alveolización	10°25'31.52"N	75°33'12.19"O
----	--	---------------	---------------

Figura 66. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 29). Fuente: Autores.

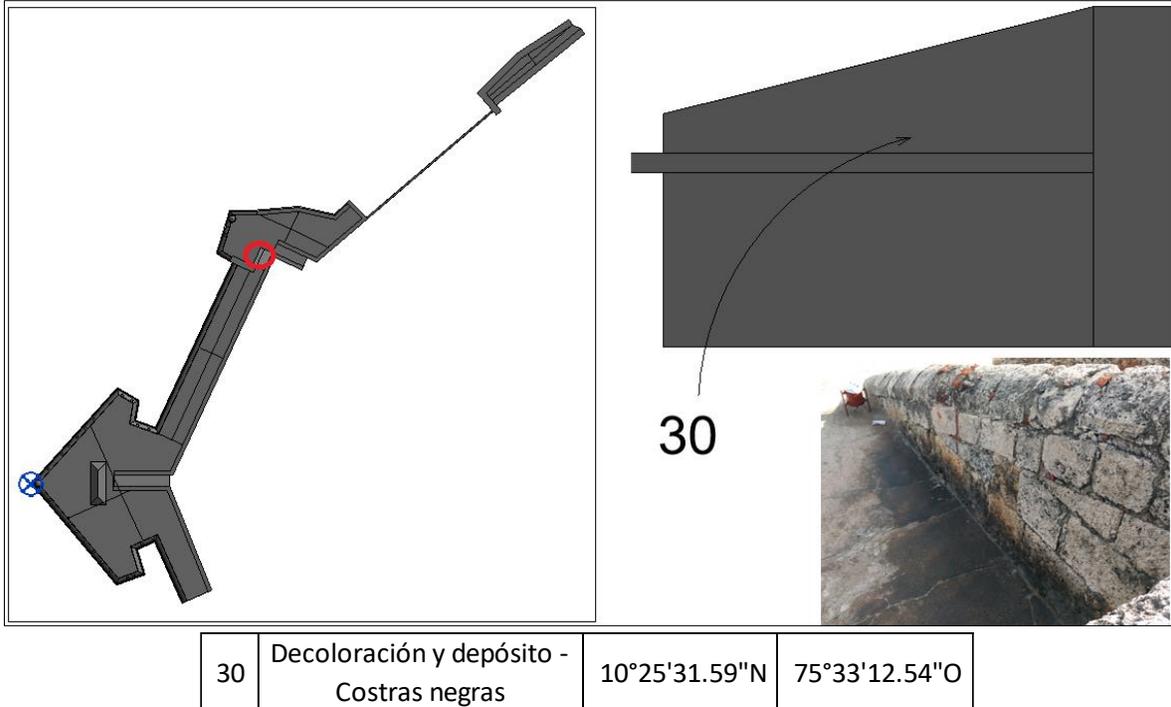


Figura 67. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 30). Fuente: Autores.

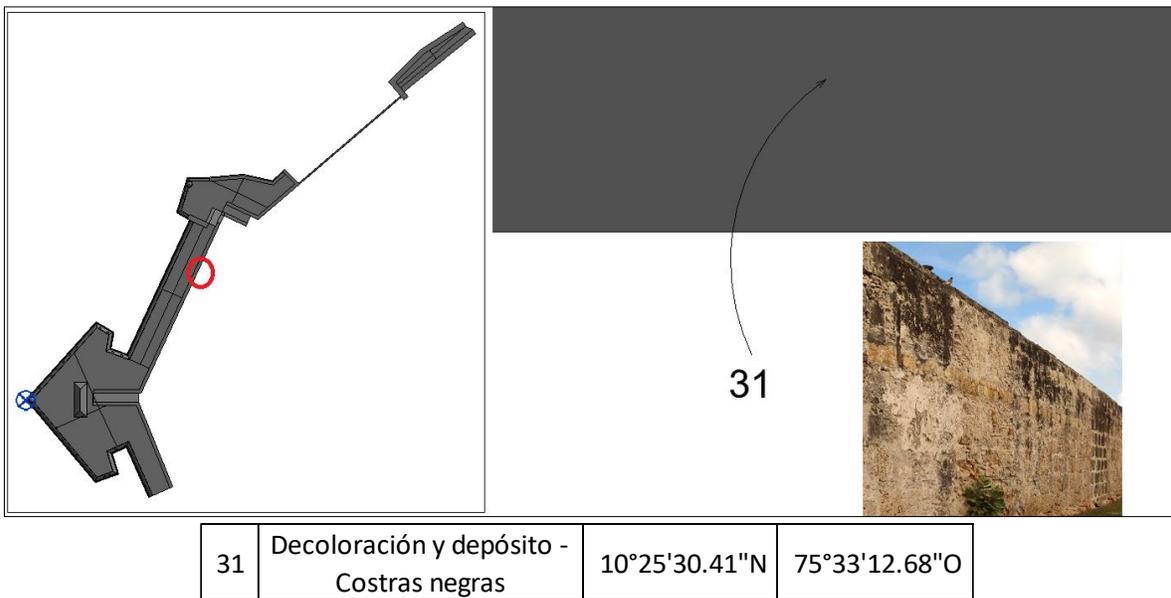


Figura 68. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 31). Fuente: Autores.

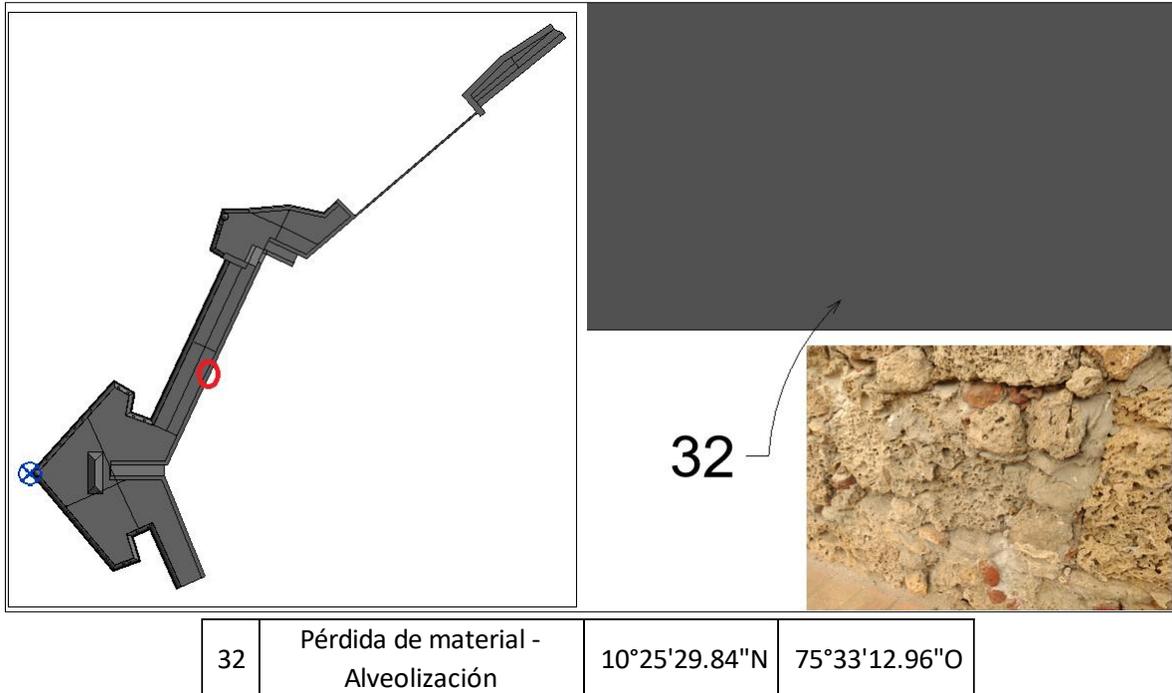


Figura 69. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 32). Fuente: Autores.

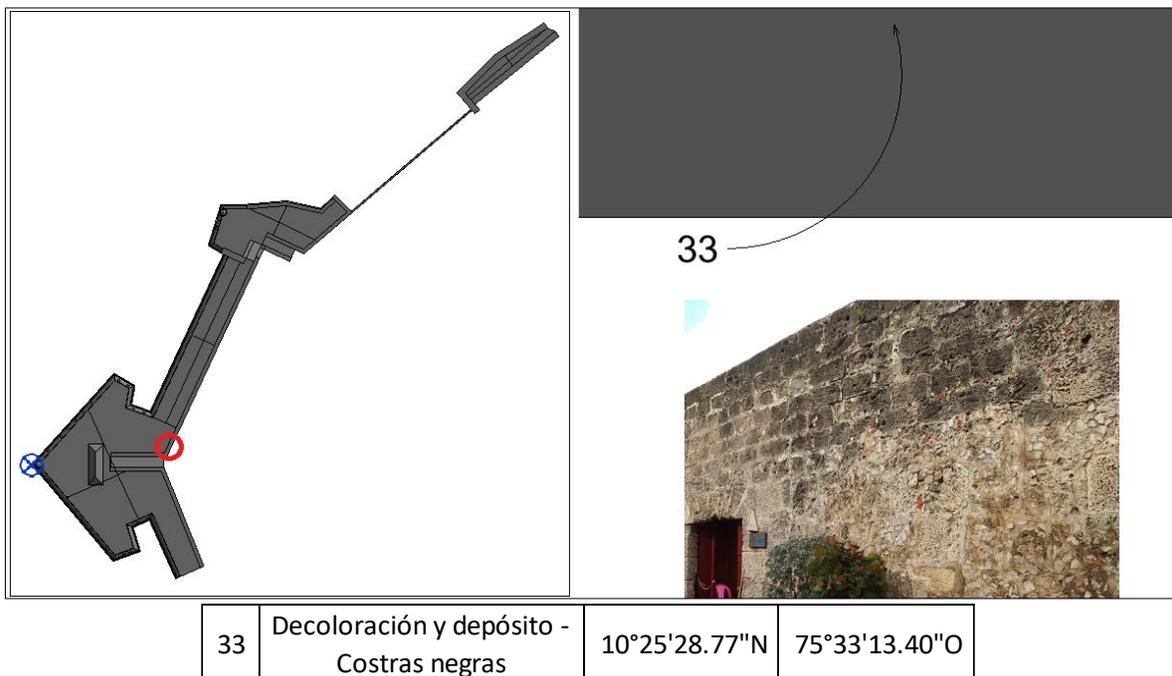
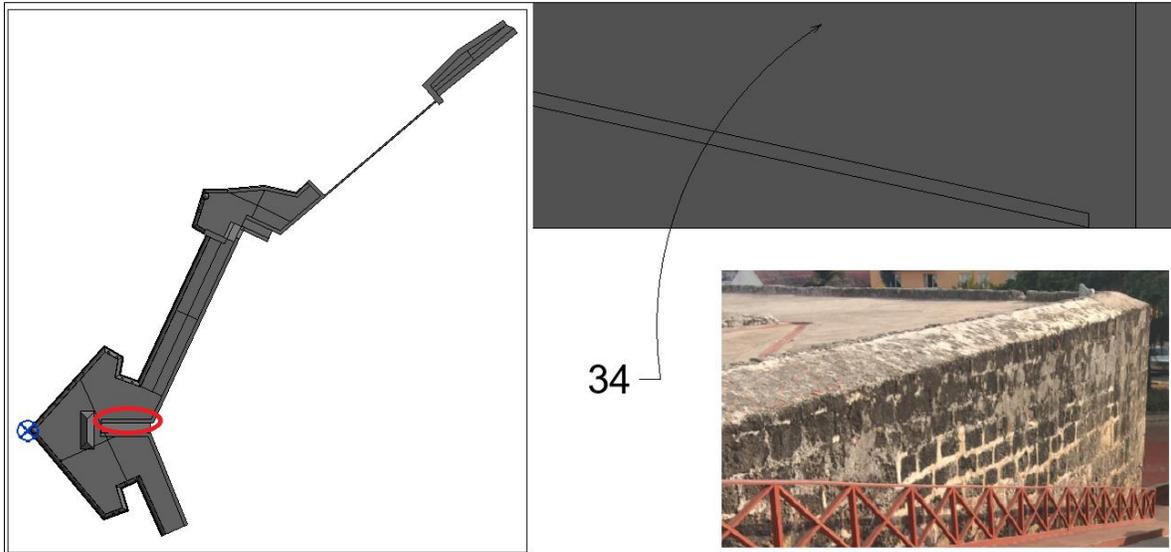
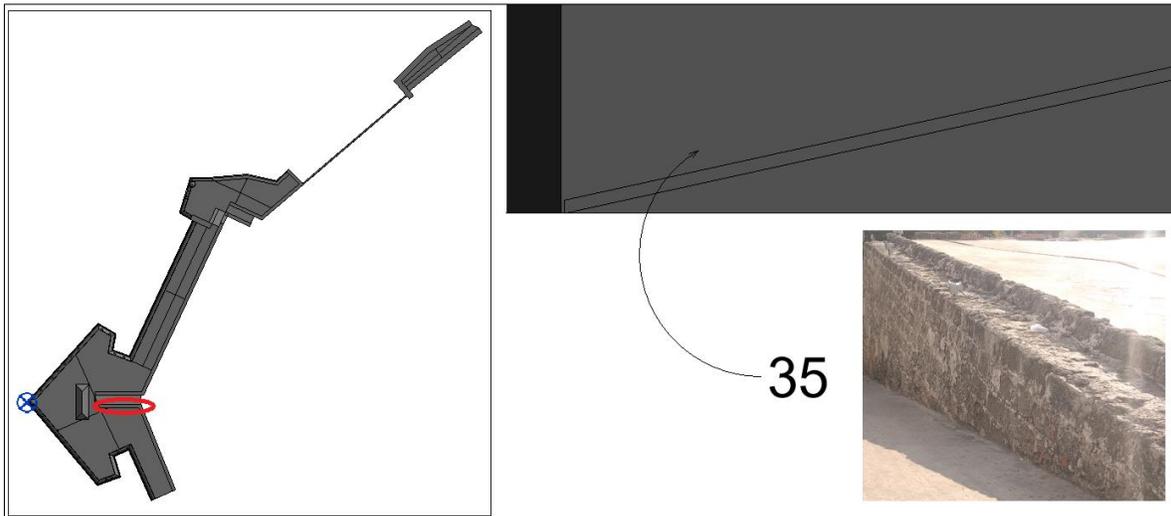


Figura 70. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 33). Fuente: Autores.



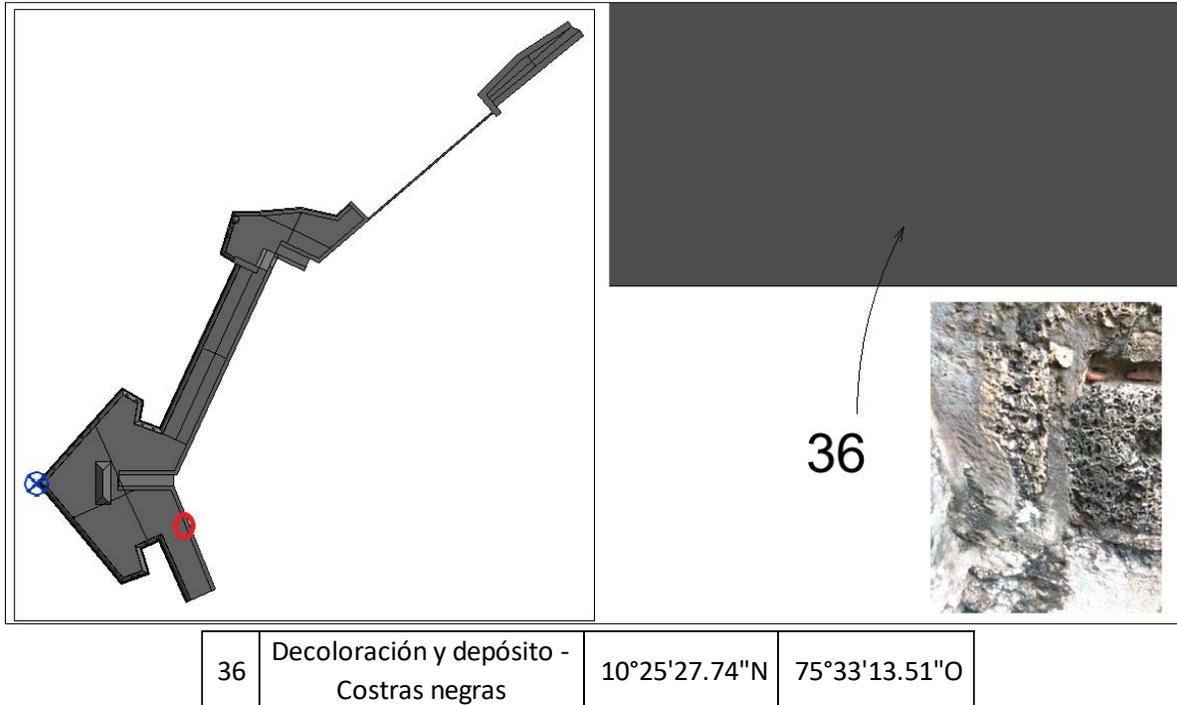
34	Decoloración y depósito - Costras negras	10°25'28.21"N	75°33'13.97"O
----	---	---------------	---------------

Figura 71. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 34). Fuente: Autores.



35	Pérdida de material - Alveolización	10°25'28.06"N	75°33'13.70"O
----	--	---------------	---------------

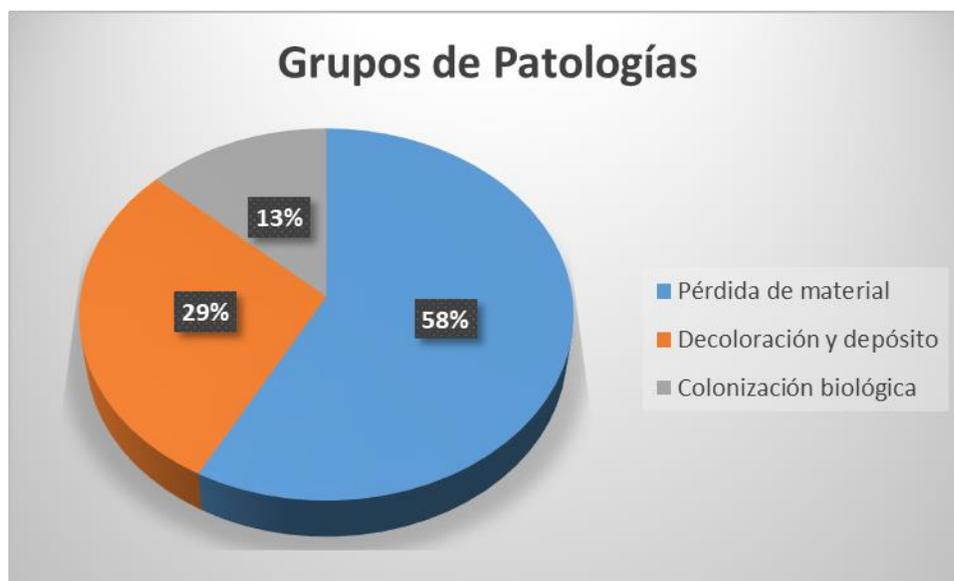
Figura 72. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 35). Fuente: Autores.



**Figura 73. Ubicación de Patología identificada y unificada en el modelo de Revit (Pat 36). Fuente: Autores.**

En la Figura 74 se muestra la distribución porcentual de patologías de acuerdo a lo identificado en el tramo de estudio, en donde la gran mayoría corresponde a patologías del grupo de pérdida de material con un 58%.

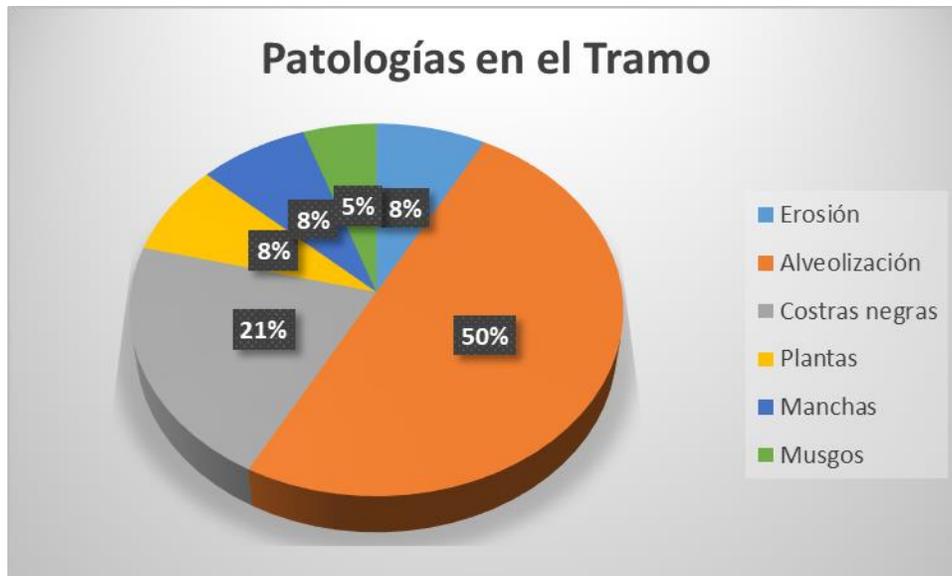
**Figura 74. Distribución por grupo de patologías en el tramo.**





Y teniendo en cuenta esa misma distribución, la patología mayormente identificada en el tramo corresponde a la alveolización con un 50%, como se muestra en la Figura 75.

**Figura 75. Distribución específica de patologías identificadas en el tramo.**



La referencia directamente relacionada con el tramo de estudio constituida por el informe del PEMP de 2018, en relación a la composición y estado de la geometría del tramo corresponde a lo reportado en el presente estudio. Así mismo, las patologías identificadas en donde, tanto la contraescarpa como la escarpa, presentan un gran porcentaje de costras, manchas negras, verdes y blancas en el pañete, producidas por factores ambientales, además de que se evidencian alteraciones cromáticas, corresponden plenamente con lo identificado en el presente trabajo, tal como se evidenció en los puntos referenciados.

Es decir que el comportamiento patológico del tramo se mantiene, lo cual se relaciona a la evidente prevalencia de los factores ambientales, así como a la ausencia de intervenciones que busquen mitigarlo o incluso corregirlo. De ahí la importancia de considerar el monitoreo y procurar la gestión del patrimonio.

El logro que implica poder agrupar toda la información recopilada y generada se extiende mucho más allá del producto que se entrega junto al presente documento, teniendo en cuenta que una de las ventajas del trabajo con elementos de la metodología BIM es que se permite actualizar el modelo regularmente, además de que se logra la consulta rápida de la información en un solo archivo, generando una percepción bien justificada de fiabilidad.



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a lo propuesto como objetivo específico, se desarrolló la clasificación e identificación de información disponible sobre los estudios realizados en el cordón amurallado de Cartagena a lo largo de la historia. Así mismo, se ubicaron e identificaron las patologías presentes en la estructura del tramo seleccionado, de acuerdo a los parámetros que establece la guía ICOMOS de las Naciones Unidas.

De acuerdo con los resultados obtenidos aplicando la metodología propuesta, se tiene que:

- Se construyó el modelo tridimensional del tramo de estudio, a través del procesamiento de la información fotográfica obtenida, los recorridos y los sobrevuelos con dron. Esto permitió cruzar los datos recopilados en campo con la información secundaria revisada referente a las patologías identificadas.
- En general el modelo refleja la estructura del tramo de estudio, en donde se pueden identificar claramente los elementos que lo componen y representa un registro actualizado del estado de conservación del tramo estudiado.
- Las patologías identificadas, coinciden directamente con lo reportado en estudios anteriores, en donde se indica que tanto la contraescarpa como la escarpa, presentan un gran porcentaje de costras, manchas negras, verdes y blancas en el pañete, producidas por factores ambientales, además de que se evidencian alteraciones cromáticas, lo cual se relaciona a la evidente prevalencia de los factores ambientales, así como a la ausencia de intervenciones que busquen mitigarlo o incluso corregirlo.
- La construcción del modelo y la integración de la información patológica identificada, permitirá realizar el seguimiento y monitoreo de las condiciones del tramo. Además, motivará que futuras investigaciones complementen la información registrada en este estudio y contribuya al seguimiento de su estado de conservación.
- Es recomendable que para el tratamiento de la información modelada se conserven los parámetros y se aplique la metodología descrita, esto considerando la compatibilidad de los archivos generados para el modelado del tramo y teniendo en cuenta la posibilidad de continuar alimentándolos.



- Es recomendable que se siga procesando información para el enriquecimiento de los modelos generados, esto se logrará a través de la depuración de una mayor cantidad de información, lo cual implica amplitud de los tiempos computacionales que dicho proceso demanda.
- En el marco de la contingencia que representó la pandemia generada por el COVID-19 no fue posible la ejecución de ensayos adicionales como lo sugería el director del proyecto. Las medidas de aislamiento, así como las restricciones de movilidad, obstaculizaron los procesos de depuración de la información y obtención de mayor cantidad de datos de campo, específicamente los ensayos de las propiedades físico-mecánicas de los materiales constitutivos del tramo en estudio. Estos ensayos serán realizados dentro del proyecto de investigación del modelado general de la muralla que realiza el grupo de investigación ESCONPAT.



## BIBLIOGRAFÍA

- Acuña Robles, G. J. (2012). *Diagnosic de los patrones de deterioro en el material pétreo de la muralla influenciado por el ambiente húmedo y salino en la ciudad de Cartagena. Estudio de caso: Sector del Baluarte de San Ignacio y la cortina entre el baluarte de San Juan Evangelista*. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- Aforca. (Diciembre de 2004). *Fortalezas en Cartagena: Murallas*. Obtenido de [http://www.aforca.org/carlos\\_iii.htm](http://www.aforca.org/carlos_iii.htm)
- Álvarez, J. L. (2019). *Restrospectiva de la Construcción del cordón amurallado de Cartagena de Indias, su presente y su futuro*. Granada: Universidad de Granada.
- AUTODESK. (22 de Octubre de 2019). <https://latinoamerica.autodesk.com>. Obtenido de <https://latinoamerica.autodesk.com/products/revit/overview>
- Berrío Villadiego, I. P., & Moterrosa Moreno, S. (2019). *Modelo 3D de las murallas de Cartagena utilizando la metodología BIM, integrando información específica sobre su estado de conservación en el tramo comprendido desde el Baluarte San Pedro Mártir hasta Baluarte De Santa Clara*. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- Berrocal Olave, A. (2016). Estudio técnico: Batería San José de Bocachica en Cartagena de Indias, Colombia. *Quiroga*, 24.35.
- buildingSMART. (2018). <https://www.buildingsmart.es>. Obtenido de [file:///C:/Users/GL62%207RD/Downloads/Gu%C3%ADa%20BIM-Patrimonio\\_Cultural.pdf](file:///C:/Users/GL62%207RD/Downloads/Gu%C3%ADa%20BIM-Patrimonio_Cultural.pdf)
- Cabrera Cruz, A. R. (2017). *El Patrimonio Arquitectónico y Fortificaciones en Cartagena de Indias. Identidad, Significado Cultural y Prospectiva*. Granda: Universidad de Granda.
- Caracol Radio. (8 de Septiembre de 2014). [www.caracol.com.co/radio](http://www.caracol.com.co/radio). Obtenido de [https://caracol.com.co/radio/2014/09/08/regional/1410183660\\_404993.html](https://caracol.com.co/radio/2014/09/08/regional/1410183660_404993.html)
- Cerón, I. A., & Liévano Ramos, D. A. (2017). *Plan de implementación de metodología BIM en el ciclo de vida en un proyecto*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- Control BIM S.L y Gea Asesoría. (26 de 07 de 2017). *Building SMART*. Recuperado el 28 de 05 de 2019, de <https://www.buildingsmart.es/2017/07/26/bim-en-la-catedral-de-palma-de-mallorca/>
- Cueto Ferreira, J. A., & Granger Serrano, E. (2010). *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica y vibracional en las murallas de Cartagena de Indias, en el sector que comprende desde Las Bóvedas hasta el Hotel Santa Clara*. Cartagena: Universidad de Cartagena.



- Cunin, E., & Rinaudo, C. (22 de Mayo de 2019). Las murallas de Cartagena entre patrimonio, turismo y desarrollo urbano. El papel de la sociedad de mejoras públicas. *Memorias. Revista digital de historia y arqueología del Caribe*. Cartagena, Colombia.
- Diaz Andrade, L. C., & Mendez Pineda, J. (2015). Plan para intervención y monitoreo de las patologías del cordón amurallado de la ciudad de Cartagena de Indias caso estudio: tramo comprendido desde el Baluarte San Pedro Mártir hasta el Baluarte de la Merced. *Plan para intervención y monitoreo de las patologías del cordón amurallado de la ciudad de Cartagena de Indias caso estudio: tramo comprendido desde el Baluarte San Pedro Mártir hasta el Baluarte de la Merced*. Cartagena de Indias: Universidad de Cartagena. Obtenido de <http://190.242.62.234:8080/jspui/handle/11227/2703>
- Fortificaciones Cartagena de Indias. (29 de Mayo de 2019). <http://fortificacionescartagena.com>. Obtenido de <http://fortificacionescartagena.com/es/historia/patrimonio-de-la-humanidad/>
- Gil Moreno, J. F., & Lascarro Estrada, C. J. (2012). *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica y vibracional en las murallas de Cartagena de Indias, en el sector que comprende desde el Convento de La Merced hasta el restaurante La Vitrola*. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- Grupoabstract. (23 de Octubre de 2019). <https://www.grupoabstract.com/>. Obtenido de [https://www.grupoabstract.com/pdfs/BIM\\_Fundamentos.pdf](https://www.grupoabstract.com/pdfs/BIM_Fundamentos.pdf)
- Herráez Concejo, B. J., & Vendrell Vidal, E. (2018). Segmentación de mallas 3D de edificios históricos para levantamiento arquitectónico. *Virtual Archaeology Review*, 66-76. Recuperado el 25 de 05 de 2019, de <http://search.ebscohost.com.unicartagena.basesdedatosezproxy.com:2048/login.aspx?direct=true&db=edb&AN=128891119&lang=es&site=eds-live>
- HildebrandtGruppe. (29 de Junio de 2015). <http://www.hildebrandt.cl>. Obtenido de <http://www.hildebrandt.cl/en-que-consiste-el-modelo-bim/>
- Idea Ingeniería. (22 de Mayo de 2019). <https://ideaingenieria.es>. Obtenido de <https://ideaingenieria.es/industria-4-0/que-es-la-tecnologia-bim/>
- Lara Ortega, S. (1991). El Teatro Romano de Sagunto: avatares de una década. *LOGGIA*, 32-37.
- Martínez Villa, M. (2018). *Modelado BIM del Patrimonio Arquitectónico para la intervención: El Teatro de Sagunto*. Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado el 25 de 05 de 2019, de [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/116217/memoria\\_77839428.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/116217/memoria_77839428.pdf?sequence=1&isAllowed=y)



- Ministerio de Cultura. (2018). *Plan Especial de Manejo y Protección - PEMP Murallas y Castillo de San Felipe de Barajas*. Cartagena.
- Monroy Díaz, E. J. (2014). *Las demoliciones del patrimonio hitórico-cultural en Cartagena de Indias: Entre la constroversia pública y los beneficios por el control y la capitalización del espacio 1890-1925*. Centro Académico Virtual Andino FLACSO ANDES.
- Navarro Sánchez, D., & Salandín, A. (Diciembre de 2019). *riunet.upv.es*. Obtenido de [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/45361/TFG\\_David\\_Navarro\\_S%C3%A1nchez.pdf?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/45361/TFG_David_Navarro_S%C3%A1nchez.pdf?sequence=1)
- Oliveros Jiménez, M. M. (2011). *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica y vibracional de las murallas del sector que comprende el Hotel Santa Clara hasta El Claustro De La Merced de la ciudad de Cartagena de Indias*. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- Pantoja Martínez, E. A., & Arzuza Díaz, M. (2012). *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica y vibracional en las murallas de Cartagena en el tramo comprendido entre el restaurante La Vitrola y el Hotel Santa Teresa*. Cartagena: Universidad de Cartagena.
- Parrinello, S., Gómez-Blanco Pontes, A., Picchio, F., Rodríguez Moreno, C., & Rivas López, E. (2019). Una forma integrada de documentar, analizar y gestionar el patrimonio arquitectónico: El todo y las partes en el palacio del Generalife. *Revista de EGA - Expresión Gráfica Arquitectónica*, 140-151. Recuperado el 25 de 05 de 2019, de <http://eds.b.ebscohost.com.unicartagena.basesdedatosproxy.com:2048/eds/detail/detail?vid=0&sid=e3f48265-aea4-469a-aa94-0b785b10b222%40sessionmgr101&bdata=Jmxhbmc9ZXMmc210ZT11ZHMtbGl2ZQ%3d%3d#AN=135871982&db=a9h>
- Quiñones, b. E. (2017). *Factores Ambientales en las murallas de Cartagena de Indias*. Cartagena de Indias: Universidad de Cartagena.
- Rendersfactory. (23 de Febrero de 2018). <https://www.rendersfactory.es>. Obtenido de <https://www.rendersfactory.es/que-es-revit-de-autodesk-y-para-que-sirve/>
- Riondet, V., Rivoira, A., Palacios, M., Lambertucci, M., Asbert, A., & Di Forte, G. (Diciembre de 2019). *rdu.unc.edu.ar*. Obtenido de <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/5753/1.16.%20La%20imagen%20t%C3%A9cnica.pdf?sequence=17&isAllowed=y>
- Segovia Salas, R. (22 de Mayo de 2019). <https://www.banrepcultural.org/biblioteca-virtual>. Obtenido de <https://www.banrepcultural.org/biblioteca-virtual/credencial-historia/numero-143/atlas-historico-de-cartagena-de-indias>
- UNESCO. (23 de Octubre de 2019). <https://es.unesco.org>. Obtenido de <https://es.unesco.org/themes/patrimonio-mundial>

