



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN**

Departamento de Expresión Gráfica e Ingeniería en la Edificación

PROYECTO FIN DE GRADO:

**OPTIMIZACIÓN EN EL POSICIONAMIENTO DE ESCÁNER  
LÁSER A TRAVÉS DE LA APLICACIÓN DEPTHPMAP**

Debora Zottoli

Tutor: Isidro Cortez Albalá

# Agradecimientos

La primera persona que tengo que agradecer es la profesora Elena Cabrera Revuelta por la ayuda y el apoyo en todos estos meses: siempre con la sonrisa, me ha acompañado paso a paso en este proyecto, dedicándome tiempo y atención.

Gracias al profesor José Antonio Barrera, siempre disponible y amable, que me ha ayudado en particular en la fase de post-procesado del levantamiento y al profesor Isidro Cortez Albalá por su apoyo y supervisión en el trabajo.

Y por fin, gracias a mi familia apoyarme y soportarme.

# Resumen

Para implementar un sistema de toma de datos geométricos a través de un escáner láser es necesario un profundo conocimiento de los principios teóricos, del sistema y del proceso de adquisición. Algunos pasos de esta compleja actividad son susceptibles a una discreta automatización mientras otros todavía requieren una labor intensa.

Un levantamiento de arquitectura conducido de manera científica, y que conduzca a una correcta adquisición de los datos, incluye una fase de “proyecto de levantamiento” que tiene que tener en cuenta los siguientes aspectos: objetivos generales del levantamiento; peculiaridades del área a levantar; instrumentos y técnicas de medición de utilizar; gestión de los datos.

La planificación del levantamiento es la condición necesaria para conseguir el resultado deseado. El concepto difuso que todo puede ser solucionado con un buen trato de los datos es erróneo: a un buen trabajo de campo sigue un buen levantamiento.

Este trabajo se centra justo sobre esta fase de proyecto de levantamiento de un espacio interior y específicamente sobre la optimización en el posicionamiento del escáner láser, o sea analizar cuáles son las mejores posiciones desde las cuales realizar la toma de los datos con el objetivo de minimizar - o, más bien, de racionalizar - los desplazamientos y evitar redundancia o insuficiencia de datos.

Entonces, el objetivo principal que la investigación, aquí desarrollada, persigue es la individuación de un instrumento que, de manera rápida y sencilla, puede ayudar los profesionales del sector del levantamiento arquitectónico a individuar, en la fase de planificación del trabajo, los mejores posicionamientos para ejecutar los escaneos.

Para conseguir dicho objetivo se utiliza el *software* UCL DephtMap una herramienta diseñada para producir un mapa de posiciones “visualmente integradas” relativo a un espacio cuyos elementos son conectados entre de ellos a través de diferentes tipos de relaciones y útil para realizar análisis de visibilidad de sistemas arquitectónicos y urbanos.

Con el estudio teórico de Depthmap y la su aplicación en concreto para el levantamiento del vestíbulo y del patio del Museo de las Artes y Costumbres Populares de Sevilla se ha llegado a la conclusión principal que esta herramienta resulta ser muy útil a los trabajos de levantamiento, y en particular a lo de un espacio interior.

**Palabras clave:** *Levantamiento Arquitectónico; Optimización; Análisis de visibilidad; Escáner láser.*

# Abstract

It's necessary a deep knowledge of the theoretic principles, the system and the acquisition process to carry out a correct data acquisition for an Architectural Survey through laser scanner. Some steps of this complex activity are susceptible to a discrete automation while others still require intense work.

An Architectural Survey leads to good results if includes a preliminary phase of "survey's project" that considers the following aspects: general objectives of the survey; peculiarities of the area objected of study; measurement instruments and techniques to use; data management.

The planning to carry out a survey is the necessary condition to achieve the desired result. The diffuse concept that everything can be solved with a good treatment of the data is erroneous: to a good field's work follows a good survey.

This work is precisely focused on the design phase of the survey of an internal space (in this case, the Museum of Popular Arts and Customs of Seville) and, in particular, on finding the optimum number of positions from which data acquisition is carried out, with the aim to minimize - or, rather, rationalize - the displacements and avoid redundancy or failure of data.

Then, the main objective of this research is the individuation of a tool that, in a quick and simple way, can help the professionals of the sector of the architectural survey to identify the best position to run the scans.

To achieve the objective of optimizing data's collection, is used the software UCL DephtMap, a tool designed to produce a map of "visually integrated" positions relative to a space whose elements are connected between them through different types of relationships and useful to perform visibility analysis of architectural and urban systems.

With the theoretical study of Depthmap and its application for the survey of the vestibule and the patio of the Museum of the Popular Arts and Customs of Seville, it has come to the main conclusion that this tool proves to be very useful to the projects of architectural survey, and in particular to an interior space.

**Keywords:** *Architectural Survey; Optimization; Visibility Analysis; Laser Scanner.*

# ÍNDICE

Agradecimientos .....	1
Resumen.....	2
1 Introducción .....	6
1.1 Punto de partida: el levantamiento arquitectónico.....	6
1.1.1 Concepto de levantamiento arquitectónico. ....	6
1.1.2 Proceso de levantamiento tradicional. ....	7
1.2 Estado de la cuestión.....	8
1.2.1 De la planificación de un levantamiento.....	8
1.2.2 De las Técnicas y Medios de adquisición.....	10
1.2.3 Fotogrametría.....	14
1.2.4 Escáner láser.....	17
1.3 Sobre el levantamiento a través de escáner láser .....	23
1.4 <i>Software</i> .....	27
1.4.1 UCL Depthmap.....	27
1.4.2 <i>Software</i> de procesamiento de nubes de puntos. ....	27
2 Justificación .....	29
2.1 Justificación de competencia .....	29
3 Objetivos .....	31
4 Metodología .....	32
4.1 Marco teórico.....	32
4.1.1 <i>Background</i> detrás de Depthmap .....	33
4.1.2 Teoría de grafos.....	35
4.2 Proceso de trabajo .....	40
4.3 Caso de estudio .....	42
4.3.1 Aníbal González .....	42
4.3.2 Pabellón Mudéjar .....	45
4.3.3 Museo de Artes y Costumbres Populares .....	49
4.4 <i>Software</i> de trabajo: UCL Depthmap, un programa para el análisis de visibilidad.....	53
4.4.1 Importación de la planta .....	53
4.4.2 Preparacion malla del grafo de visibilidad .....	54
4.4.3 Construcción grafo de visibilidad .....	55
4.4.4 Análisis de visibilidad (VGA: visibility graph analysis) .....	57
4.5 Análisis de visibilidad.....	62
4.6 Materialización del levantamiento.....	69
4.7 Elaboración de la planimetría.....	70

5	Resultado de la investigacion .....	74
6	Conclusiones.....	79
7	Lineas de investigacion abiertas.....	81
8	Tabla de ilustraciones.....	82
9	Bibliografia.....	84

# 1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo es una investigación de frontera, dado que se utilizan metodologías y conceptos de las **Matemáticas Aplicadas** en el ámbito científico-técnico de la **Expresión Gráfica Arquitectónica**.

Dentro de la Expresión Gráfica Arquitectónica, la investigación se ubica en el área de los **Sistemas de Representación Técnicos y la Topografía** y, en concreto, trata sobre la mejora en los procesos de trabajo en los levantamientos arquitectónicos de edificios de interés histórico y cultural.

La importancia y las peculiaridades del levantamiento arquitectónico en el ámbito patrimonial frente a otros levantamientos en edificación, demanda un esfuerzo en tecnología y especialización suficiente como para recibir un tratamiento especial en la investigación.

Además, si por un lado el avance en la tecnología de los instrumentos topográficos, así como en los programas informáticos, ha permitido una representación de edificios más detallada y rápida, por otro lado, la fiabilidad de un levantamiento depende todavía de saber utilizar correctamente las diferentes técnicas (Cabrera Revuelta, 2017).

En consecuencia, es esencial desarrollar una investigación en el campo de las herramientas y de los métodos de trabajos que puedan ayudar al trabajo de los profesionales del sector y facilitar las operaciones de levantamiento arquitectónico.

En esta investigación se han estudiados también algunos de los conceptos principales de la **Teoría de Grafos**, una rama de las **Matemáticas y las Ciencias de la computación (Operation Research)**. Este estudio ha sido necesario para entender las técnicas de representación gráfica en Depthmap.

## 1.1 Punto de partida: el levantamiento arquitectónico.

### 1.1.1 Concepto de levantamiento arquitectónico.

*“El levantamiento arquitectónico es una operación orientada a comprender la obra en la su totalidad (...); levantar significa en primer lugar comprender la obra que tenemos antes de nosotros, identificar todos los valores de esta, desde los dimensionales hasta los constructivos, desde los formales hasta los culturales.”* (Docci & Maestri, 2009)

El levantamiento arquitectónico *“distingue los conocedores de los que permanecen en la superficie, aunque llamada culta, del conocimiento”*. (Sampaolesi, 1973). Esta frase de Pietro Sampaolesi es emblemática del renovado interés por una disciplina que durante muchos siglos se considera una de las principales herramientas para saber leer la arquitectura.

Para la definición del término levantamiento se hace referencia a la *Carta del Rilievo* (Almagro, y otros, Carta del Rilievo, 1991) debatida y aprobada en el Congreso *Il rilievo dei beni architettonici per la conservazione*, celebrado en Nápoles en abril de 1999, donde el profesor Cesare Cundari de la Universidad de La Sapienza de Roma aglutinó un grupo de expertos de Italia, Francia y España cuyo trabajo quedó redactado en este documento.

Utilizando las palabras de Antonio Almagro Gorbea, que en su obra *Levantamiento Arquitectónico* incluye la misma documentación relativa al concepto de levantamiento manifestado en la *Carta del Rilievo*, se puede decir que “(...) se debe entender por levantamiento arquitectónico la forma primigenia de conocimiento y por lo tanto el conjunto de operaciones, de medidas y de análisis necesarios para comprender y documentar el bien arquitectónico en su configuración completa, referida incluso al contexto urbano y territorial, en sus características dimensionales y métricas, en su complejidad histórica, en sus características estructurales y constructivas, así como en las formales y funcionales”. (Almagro A. G., 2004)

Levantar una arquitectura es un proceso complejo que no se limita simplemente a una operación métrica, sino que consiste también en una actividad de investigación iconográfica, bibliográfica y archivística que actúa para adquirir todos los aspectos ligados al conocimiento de una obra construida y todos los datos necesarios para su reconstrucción y representación gráfica, de manera científicamente correcta.

El levantamiento arquitectónico es un campo de aplicación de la geometría descriptiva, un conjunto de prácticas y métodos que permiten reconducir las características fundamentales de un objeto en un sistema de representaciones, principalmente bidimensionales; este proceso, en general, se concluye con una serie de elaborados gráficos que son la base para operaciones de documentación, estudio, conservación del mismo objeto y eventual intervención.

Entonces, es posible decir que el levantamiento arquitectónico es un sistema abierto de conocimientos, de carácter científico-técnico, de un objeto arquitectónico construido y tiene como objetivo la lectura histórica de un edificio y su entendimiento proyectual y constructivo, puntos base para cualquier catalogación de patrimonio cultural, o bien para posibles actuaciones sobre el objeto arquitectónico en cuestión.

### 1.1.2 Proceso de levantamiento tradicional.

En la edición del congreso *Il rilievo dei beni architettonici per la conservazione* del año 2000, en Roma, se aprobó la *Declaración sobre el levantamiento*, un documento que sintetiza la *Carta del Rilievo*, y además ofrece unos planteamientos adicionales a la propia Carta, actualizando los contenidos y la organización de la información. (Almagro, y otros, *Declaración sobre el levantamiento*, 2000)

En este documento se habla sobre el proceso y la metodología del levantamiento. Aunque no establece modelo alguno en cuanto a fases o etapas a seguir, plantea que, dado su carácter de actividad investigadora, es fundamental que la realización de levantamiento esté precedida de un proyecto de levantamiento que planifique las acciones a cumplir. Según la Declaración, el proyecto ha de precisar los métodos de levantamiento a utilizar, sin descartar la conjunción de varias técnicas.

Tradicionalmente el proceso de levantamiento ha constado de las siguientes fases (Barrera Vera, 2006):

- **Trabajo de campo.** En esta fase se realiza la toma *in situ* de los datos geométricos necesarios para la siguiente reproducción del objeto de levantar.
- **Trabajo de gabinete.** Es una fase de restitución de las medidas: tras la toma de datos, es necesario procesarlos y manejarlos para definir el modelo geométrico del objeto de estudio.

- **Presentación de resultados.** Es la fase de elaboración de la documentación gráfica definitiva de la forma más adecuada con relación a la escala y el grado de detalle, los colores, el formato, etc.

Esta es una estructura del proceso de levantamiento que se venía dando hasta hace aproximadamente una década; en el contexto actual, el proceso se convirtió en un esquema mucho más complejo como resultado de la innovación que concierne a todas las fases. (Barrera Vera, 2006).

## 1.2 Estado de la cuestión

El avance tecnológico, por un lado, se traduce en la necesidad de una mayor especialización en los medios empleados y en los resultados; por otro lado, a través del desarrollo de herramientas sencillas de modelado 3D, ha permitido la difusión de productos excesivamente divulgativos que a veces están lejos de proporcionar una representación geométrica científicamente correcta.

Hasta hace unas décadas, el levantamiento tenía como único objetivo la creación de una base gráfica para la documentación de una intervención arquitectónica, en la actualidad existe un dilatado espectro de posibles productos demandados, que quieren distintos grados de especialización a los que corresponden diferentes objetivos perseguidos (Barrera Vera, 2006).

Hoy, de hecho, el proceso de levantamiento se caracteriza por un grado de complejidad mayor en comparación con el levantamiento tradicional y por esto es necesario el desarrollo de un proyecto previo de levantamiento.

### 1.2.1 De la planificación de un levantamiento

De momento no hay ningún proceso estándar para la planificación de un levantamiento. Sin embargo, la planificación debe contener los siguientes puntos (Lerma García & Biosca Tarongers, 2008):

- Determinar los objetivos.
- Análisis del área a levantar.
- Determinar las técnicas de medición y el equipamiento.
- Gestión de los datos.



**Imagen 1: Un posible flujo de trabajo con escáner láser terrestre. (Lerma García & Biosca Tarongers, 2008)**

#### 1.2.1.1 *Objetivos del levantamiento*

En el caso de empleo de escáner láser, uno de los puntos clave para la ejecución del levantamiento es conocer cuáles son las finalidades de lo mismo. La justificación de la necesidad de levantar un objeto o un edificio puede proporcionar una idea acerca de los requerimientos en los resultados y en la precisión de las operaciones de adquisición: sabiendo las necesidades es posible elegir la técnica de medición más apropiada. Por supuesto, en relación con la motivación de la documentación, es necesario definir los documentos a entregar: la naturaleza de las restituciones (planos 2D, modelos 3D o animaciones) influye en el levantamiento y las informaciones a adquirir.

#### 1.2.1.2 *Análisis del área a levantar*

Recopilar cuanta más información mejor sobre el objeto a documentar da una idea de la complejidad y del tiempo necesario para llevar a cabo la tarea, además puede ayudar a determinar los posibles problemas durante la adquisición de los datos (Lerma García & Biosca Tarongers, 2008).

La precisión de las operaciones requeridas viene condicionada por la escala del levantamiento o por la entidad mínima reconocible en los productos finales que se entregan (grado de resolución).

Es importante examinar también las condiciones del entorno circunstante, identificando la presencia eventual de obstáculos que pueden limitar la libertad de estacionamiento o de restricciones temporales para acceder al lugar.

Utilizando todos estos datos se puede elegir la técnica y los instrumentos más adecuados. El escaneado láser es una técnica muy desarrollada, pero no siempre es la solución más efectiva; algunas veces es mucho más fácil y eficiente usar alguna otra técnica.

### 1.2.1.3 *Determinación de las posiciones óptimas del escáner láser*

Una vez recopilada la información de sitio a documentar y elegido el instrumento para proceder a la adquisición de los datos es necesario planificar las estaciones de toma de los datos (dónde colocar el escáner láser).

Las posiciones óptimas para el estacionamiento del escáner se deben elegir de manera que garanticen una máxima cobertura y precisión, y, al mismo tiempo, se minimice el número de desplazamientos.

La siguiente lista proporciona un conjunto de reglas prioritarias a tener cuenta para un correcto estacionamiento del instrumento (Lerma García & Biosca Tarongers, 2008):

- Comprobar que las posiciones cubren la mayor área posible sin obstáculos en la línea de vista y que se producen las menos sombras posibles.
- Comprobar que se cumplen los alcances mínimo y máximo para alcanzar la precisión requerida. Cuanto mayor sea la distancia al objeto, menor será la precisión y la resolución.
- Minimizar la aparición de pequeños ángulos de intersección. Con ángulos muy agudos el haz láser no se refleja tan bien, por lo que la precisión del escáner es menor.
- Intentar reducir, con prudencia, el número de estacionamientos.
- Valorar la visibilidad de los puntos de referencia artificial o natural.
- Tener en cuenta del entorno (vibraciones, viento, etc.).

### 1.2.1.4 *Gestión de los datos.*

Es indispensable reflexionar acerca de la cantidad de los datos adquiribles y de la su relativa ocupación de la memoria antes de empezar a escanear. El escáner láser es un instrumento que en breve permite adquirir una gran cantidad de coordenadas espaciales que requiere una prudente planificación del proyecto de levantamiento (Lerma García & Biosca Tarongers, 2008).

## 1.2.2 De las Técnicas y Medios de adquisición.

Por supuesto, el levantamiento es un proceso de estudio que tiene finalidades específicas que determinan el recorrido de la adquisición: la elección de un medio de levantamiento depende del trabajo a realizar y de las peculiaridades del caso de estudio.

Normalmente en un mismo trabajo conviven diferentes medios, desde los más tradicionales hasta las últimas tecnologías.

En la su tesis doctoral, José Barrera Vera señala que *“no existe unanimidad en cuanto a la clasificación de los medios ni en cuanto a los criterios de clasificación ni siquiera, dentro de un mismo criterio, en la inclusión en un grupo u otro grupo (...) La conjunción de medios de adquisición diversos en un mismo levantamiento es tan habitual que, posiblemente sea la principal causa de las ambigüedades de las distintas clasificaciones”*. (Barrera Vera, 2006)

Una clasificación posible de los medios de adquisición puede ser (Barrera Vera, 2006):

- **Medios directos.**

El levantamiento se realiza en contacto directo con el objeto a levantar. La operativa apropiada es la trilateración y se utilizan instrumentos de medidas tradicionales y sencillos como la cinta métrica, la plomada, el nivel, etc. Existen también nuevos instrumentos que los sustituyen como los niveles laser y los distanciamientos electrónicos manuales.

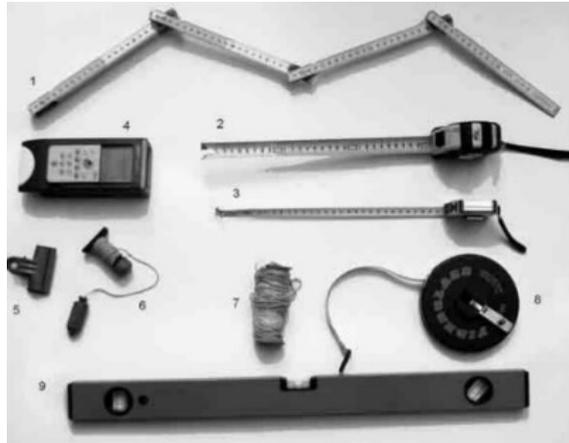


Imagen 2: Instrumentos tradicionales de medición para el levantamiento directo. (Bianchini)

Las medidas pueden ser anotadas en uno, o más, croquis, realizado *in situ*, que representa el objeto a levantar en la su configuración elegida (planta, sección, etc.), reproduciendo con atención las proporciones de este. El croquis es un elemento fundamental de las operaciones de levantamiento directo: tiene que ser programado y realizado con suficiente claridad y contener informaciones dimensionales y constructivas que pueden ser útiles para el levantamiento a cumplir.

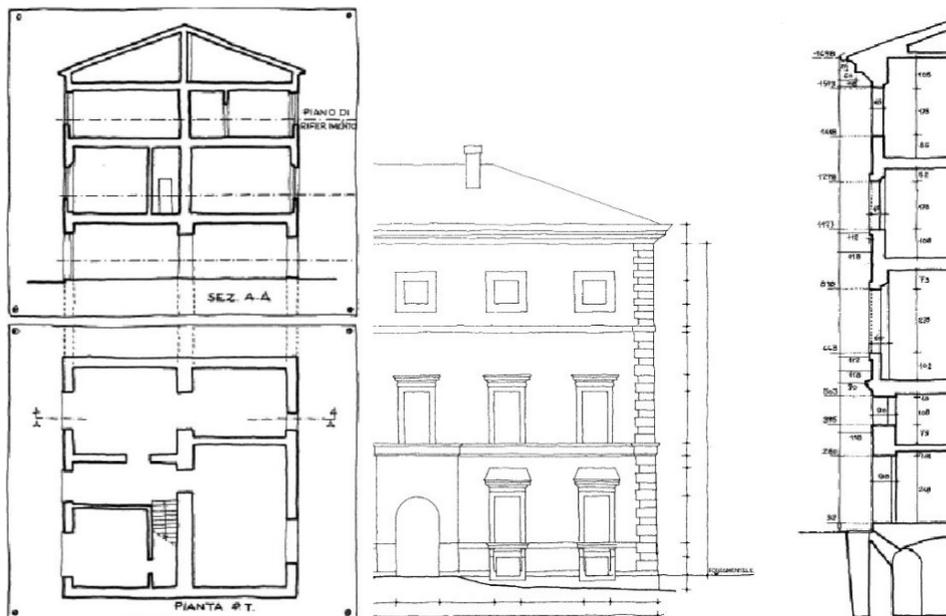


Imagen 3: Ejemplos de croquis. (Docci & Maestri, 2009)

El levantamiento directo es un paso fundamental en la documentación de un bien arquitectónico porque permite identificar inmediatamente errores eventuales en las mediciones y corregirlos, valorando *in situ* las posibles alternativas. Sobre todo, es un método que permite familiarizar con el objeto a levantar: tocarlo y observarlo en cada parte mientras se cogen las medidas es el modo más eficaz para conocerlo, entender los problemas y buscar las soluciones. Por otro lado, su uso tiene serias limitaciones, es un método lento y laborioso para alcanzar resultados de calidad.

▪ **Medios indirectos.**

Con los medios indirectos no se obtienen *in situ* dimensiones que permitan la construcción gráfica directa: las mediciones son efectuadas con instrumentos ópticos, mecánicos o informáticos de gran precisión que ejecutan una serie de cálculos más o menos complejos para conseguir una traducción gráfica de los objetos levantados dentro de un sistema de coordenadas espaciales.

Son sistemas que realizan una toma de datos masiva de puntos reales y que, posteriormente en gabinete, son capaces de dar las coordenadas espaciales de cada punto a levantar: al contrario que el levantamiento directo, que utiliza instrumentos de medición simples, el levantamiento instrumental produce siempre datos tridimensionales.

En este grupo se clasifican las estaciones totales, escáneres tridimensionales y técnicas fotogramétricas, por lo tanto, se puede hacer una distinción en:

- **Medios Topográficos.**

El levantamiento topográfico se realiza con la ayuda de instrumentos como teodolitos, taquímetros, niveles o estaciones totales (que se pueden considerar como la última evolución de los teodolitos).

La principal ventaja de estos métodos es la exactitud y precisión con la que se conocen las coordenadas de los puntos leídos. Como inconveniente destaca que la toma de datos no es de forma masiva y que se precisa de equipos profesionales, de alto coste y difícil manejo.

- **Medios Fotogramétricos.**

A partir del inicio del siglo XX, la Fotogrametría tuvo un gran desarrollo en el levantamiento del territorio a través de la Fotogrametría Aérea, y luego ha encontrado mayores aplicaciones en el levantamiento de fachadas de edificios históricos (Fotogrametría terrestre o Fotogrametría de Objeto Cercano).

La principal ventaja es el fácil acceso a los equipos necesarios: basta con tener acceso a una cámara de fotos convencional. La fotogrametría supera considerablemente en precisión y reducción de tiempos a sistemas directos tradicionales; sin embargo, el resultado depende en gran medida de la calidad de la imagen.

Se necesita un software especializado para poder procesar los datos.



**Imagen 4: Estación topográfica de última generación. Leica Geosystem.**

- **Otros medios: Nuevos Medios de Adquisición.**

Principalmente se trata de los escáneres láser que se diferencian de las estaciones topográficas en que la adquisición de datos es masiva y con una alta resolución; además incorpora la información de color. La gran resolución de puntos obtenidos, la rapidez de la toma de datos y el software que incluyen estos aparatos, permiten la visualización de los resultados en tiempo real, de forma muy realista. Además, su rango de trabajo es amplio, llegando hasta los 350 metros.



**Imagen 5: Escáner Láser de última generación. Leica Geosystem.**

El inconveniente de estos medios de adquisición es el elevado coste y la utilización de software muy específico y complejo, así como la necesidad de profesionales especializados en el manejo de estos datos. Por otra parte, hasta hace relativamente poco tiempo, este sistema adolecía precisamente de la capacidad de incluir un proceso reflexivo capaz de discriminar o clasificar la ingente cantidad de información que es capaz de aportar.

Hoy, a través de escaneos y fotogrametría digital, junto con levantamientos topográficos que garantizan la calidad de los resultados, se obtienen las nubes de puntos, que son la mejor manera posible para documentar la realidad en sus tres dimensiones.



Imagen 6: Resultado de la toma con escáner 3D de la Fortezza da basso de Florencia. (MicroGeo , s.f.)

Otra clasificación de las técnicas utilizadas en el levantamiento arquitectónico establece la diferenciación entre los principios de funcionamiento de los instrumentos utilizados (Lerma García & Biosca Tarongers, 2008):

- **Técnicas *imaged-based***, que utilizan sensores ópticos pasivos (cámaras fotográficas) que no emiten ninguna radiación y están basados en el reconocimiento de la radiación ambiental refleja. Con estas técnicas se adquieren informaciones bidimensionales (imágenes) que necesitan una elaboración geométrico-matemática para establecer una correspondencia biunívoca entre los datos de las tomas fotográficas y las relativas coordenadas espaciales.
- **Técnicas *range-based***, que utilizan sensores ópticos activos (escáneres láser) capaz de emitir una radiación controlada y registrar la relativa reflexión. Con estas técnicas se adquieren informaciones relativas a la posición espacial de los puntos; eventuales informaciones relativas al color son conseguidas a través de una cámara fotográfica externa o integrada al mismo instrumento.

### 1.2.3 Fotogrametría

Photo = light (luz)

Gamma = draw (dibujo)

Metry = measurement (medición)

*“La Fotogrametría es el arte, la ciencia y la tecnología, que obtiene información real sobre objetos físicos y el medio ambiente a través de procesos de grabación, medida e interpretación de imágenes fotográficas”.*<sup>1</sup>

Entonces, la Fotogrametría puede entenderse como una técnica, en el ámbito de la ciencia de la representación, para realizar mediciones e interpretaciones confiables por medio de fotografías y, de

---

<sup>1</sup> definición exacta de Fotogrametría de la American Society for Photogrammetry and Remote Sensing – ASPRS, 1979

esa manera, para obtener características métricas y geométricas (y no solamente, como por ejemplo datos sobre el color) del objeto fotografiado.

Con esta definición se resalta el carácter científico y cuantitativo de la fotogrametría, en clara asociación con las dimensiones, forma y posición espacial de los objetos fotografiados.

### Clasificación de la fotogrametría (Apuntes de teoría. Principios de fotogrametría)

- **Fotogrametría monoscópica:** se emplea únicamente una imagen para la restitución. Trabajando con una foto, se puede obtener información en primera instancia de la geometría del objeto, es decir, información bidimensional. En multitud de ocasiones los levantamientos tienen como objetivo parámetros simples cuyos elementos se encuentran situados sobre superficies planas; en este caso es posible utilizar la rectificación fotográfica que es el método más sencillo para la obtención de planos. La rectificación fotográfica es el proceso que consigue transformar o enderezar una perspectiva fotográfica obteniendo una representación semejante a la que se conseguiría en la fotografía estrictamente perpendicular al plano. La limitación más importante es la falta de planeidad del elemento a rectificar. El resultado final es una fotografía digital corregida y presentada a una escala o resolución conocida, sin embargo, se puede extraer información vectorial de los elementos de interés del alzado sin necesidad de reconstruir la imagen, como en el caso de trabajar con algunos programas de diseño (por ejemplo, AutoCAD).
  
- **Fotogrametría estereoscópica:** se usan pares de imágenes. Trabajando con dos fotos, en la zona común a estas (zona de solape) se puede tener visión estereoscópica, o dicho en otro modo, información tridimensional. La estereofotogrametría, que imita el comportamiento de la visión binocular, es el método más utilizado en cuanto a los levantamientos gráficos tridimensionales obtenidos directamente por restitución vectorial: un objeto es fotografiado desde dos puntos de vistas diferentes para obtener una visión tridimensional del mismo (Balletti, Guerra, Fregonese, & Monti). Para la toma fotográfica es importante realizar una planificación, basándose en el objeto arquitectónico: para establecer un criterio eficaz de posición para la toma, se emplea una relación de B/H (de entre 1/3 a 1/20), donde B es la distancia entre los pares de imágenes y H la altura del objeto (Cabrera Revuelta, 2017).
  
- **Ajuste simultáneo o *Bundle adjustment*:** se utiliza un gran número de imágenes de diferentes puntos de vista alrededor del objeto y con ejes convergentes. (Girelli) Este proceso se utiliza para la reconstrucción tridimensional de un objeto a partir de fotografías cuando esto es demasiado complejo en dimensiones y geometría para ser levantado a través de la fotogrametría estereoscópica. En el *Bundle adjustment* se tienen en cuenta todas las imágenes de forma simultánea, reconstruyendo el rayo de visión de cada cámara en el espacio. Para la orientación de las imágenes pueden ser utilizados puntos de control de coordenadas conocidas, vínculos geométricos de distintos tipos o el modelo conseguido puede ser escalado por medidas directas de distancia, tomadas directamente sobre el objeto. La redundancia de información permite obtener precisiones elevadas y localizar y eliminar eventuales errores sistemáticos, por esto el *Bundle Adjustment* ofrece la precisión más alta de la que se consigue con cualquier otro método de ajuste fotogramétrico.

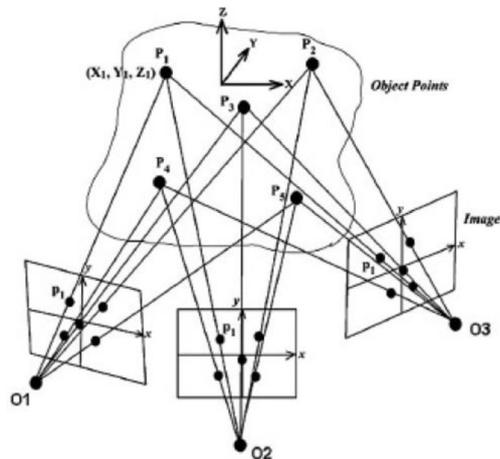


Imagen 7: Principio de la triangulación fotogramétrica o Bundle Adjustment (Russo, Remondino, & Guidi, 2011)

En función de la distancia desde la cámara al objeto fotografiado, la fotogrametría se puede también clasificar en (Apuntes de teoría. Principios de fotogrametría):

- **Fotogrametría terrestre o de objeto cercano o *Close range***: tiene su principal aplicación en la arquitectura y la arqueología; se basa en el principio de la toma de fotografías desde la tierra, con posición de la cámara y el objeto perfectamente conocida y menor a 300 metros.
- **Fotogrametría aérea**: sirve para producción de cartografía y es la que utiliza foto aéreas tomadas desde una cámara ubicada en una plataforma especial, a una distancia mayor de 300 metros del objeto a reconstruir.

Además, según el tipo de tratamiento, se puede hablar de:

- **Fotogrametría analógica**: se basa en la utilización de aparatos de restitución ópticos o mecánicos, donde el operador realizaba la alineación de las imágenes para crear un modelo estereoscópico debidamente nivelado y escalado. Por otro lado, la confección de mapas, con información planimétrica, se realizaba con el principio de la marca flotante o graficadoras basadas en este principio.
- **Fotogrametría analítica**: con la utilización de los restituidores analógicos y la incorporación de las computadoras se da inicio a la fotogrametría analítica. Se crea al restituidor analítico agilizando los tiempos y logrando niveles de detalle a diferentes escalas. Se posibilita el vuelco de información a programas de tipo CAD.
- **Fotogrametría digital**: finalmente al avance tecnológico hizo posible llegar a la fotogrametría digital. El uso de las computadoras y los programas o software aplicados dan origen a los modelos digitales 3D. Las imágenes digitales son importadas a la computadora y el operador puede identificar con buena precisión los puntos homólogos o bien la computadora realiza estas operaciones por comparación de imágenes; finalmente el resultado es una imagen en formato ráster o vectorial.

Es banal observar cómo la llegada de la era digital y la relativa automatización haya revolucionado y mejorado los procesos fotogramétricos: orientación automática utilizando solo puntos de referencia naturales, *dense image matching* desde cada pixel de la imagen, *texturing* y *meshing* automáticos, etc.

## Aplicaciones

Desde sus inicios, la fotogrametría fue utilizada con mucho éxito en la generación de mapas con curvas de nivel, los cuales proporcionaban información planimétrica de una zona determinada (Apuntes de teoría. Principios de fotogrametría).

En la Ingeniería se utiliza esta técnica en el estudio de proyectos de rutas, autopistas, presas, canales, acueductos, obras de arquitectura, levantamientos catastrales, geológicos, agrícolas, uso del suelo, etc.

Las ventajas más relevantes que la disciplina propone son:

- Reducción de costes de proyecto: la rentabilidad del método frente a la tradición topográfica se hace cada vez mayor a medida que se incrementa el área de estudio porque hay un menor tiempo de trabajo.
- Registro multitemporal, en efecto al utilizar fotografías de una zona en un determinado momento, es posible la comparación con otras épocas
- Alternativa única para el levantamiento de regiones intransitables, ya sea por problemas topográficos, geográficos o políticos.

Entre las desventajas:

- Coste elevado para trabajos de poca envergadura
- Utilización de personal cualificado y con experiencia.

### 1.2.4 Escáner láser

El escaneado láser describe un método mediante el cual una superficie es digitalizada usando la tecnología láser: se analiza un entorno u objeto real para tomar datos sobre su forma y, posiblemente, su apariencia (por ejemplo, el color). Los datos capturados pueden ser usados para realizar reconstrucciones digitales, planos bidimensionales y/o modelos tridimensionales útiles en una gran variedad de aplicaciones.

La ventaja principal de esta tecnología es la posibilidad de tomar una gran cantidad y densidad de datos (puntos) con una alta precisión en un tiempo relativamente corto (ventaja que, a falta de un enfoque científico, se puede transformar, como suele ocurrir, en un problema por la gran cantidad de datos).

Se puede decir que hacer un escaneado láser es como tomar una fotografía con información de profundidad y, al igual que en el caso de la fotografía, los escáneres láser son instrumentos de línea de vista, por tanto, es necesario realizar capturas múltiples desde diferentes estaciones para garantizar una cobertura completa de una estructura a observar.

La tecnología actual de los escáneres láser se puede dividir en dos categorías: estáticos y dinámicos.

Cuando el escáner se mantiene en una posición fija durante la toma de datos, se llama escaneado láser estático. Las ventajas de este método son alta precisión y la relativa alta densidad de puntos.

En los casos de láser escáner dinámico, el escáner se suele montar en una plataforma móvil, requiriendo otros sistemas de posicionamientos adicionales tales como INS o GPS, lo que implica que es un sistema de adquisición más complejo y caro.

### 1.2.4.1 El espectro electromagnético y la luz

La razón por la que los objetos son “visibles” es porque emiten, reflejan o transmiten una parte visible del espectro electromagnético; esta parte visible está compuesta por los colores que el ojo humano puede ver, desde los rojos y naranjas hasta los azules y violetas. Cada uno de los diferentes colores corresponde a una longitud de onda diferente. (Lerma García & Biosca Tarongers, 2008)

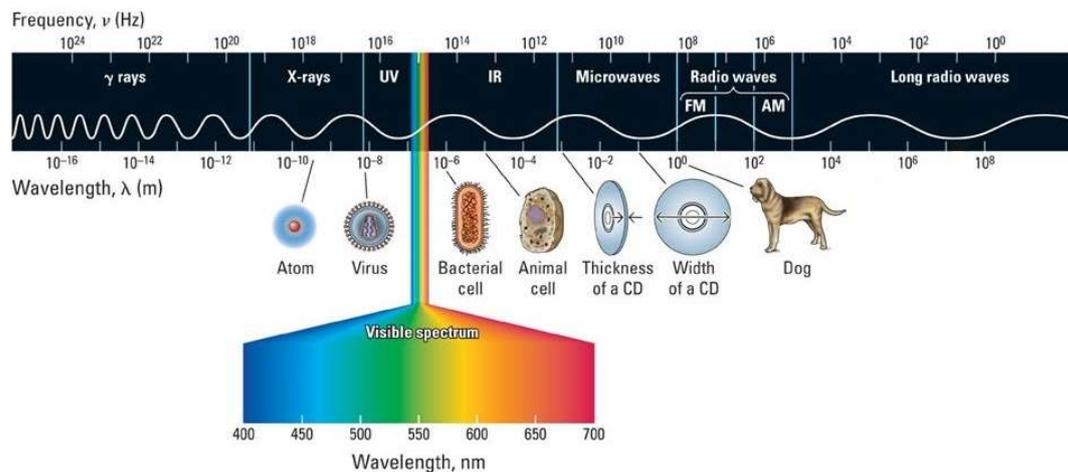


Imagen 8: Espectro electromagnético.

### 1.2.4.2 Láseres

A un instrumento que sea capaz de generar ondas de luz usando una estrecha banda del espectro electromagnético se llama láser. Un láser típico emite luz en un estrecho y poco divergente haz de longitud de onda bien definida, correspondiente a un color particular si el láser que se utiliza opera en el espectro visible.

Actualmente los láseres se usan en la vida diaria, por ejemplo, en los dispositivos de almacenamiento óptico como los reproductores de CD y DVD, en los cuales el láser escanea la superficie del disco para la lectura de los datos. Otras aplicaciones son los lectores de los códigos de barra, los punteros laser, etc. En la industria los laser se usan para cortar metales, para grabar estampados; también se utilizan en aplicaciones médicas y militares (Lerma García & Biosca Tarongers, 2008).

La luz generada mediante un instrumento láser tiene algunas características muy especiales que la distinguen de la luz proveniente de otras fuentes (Lerma García & Biosca Tarongers, 2008):

- Se propaga en una dirección bien definida con un haz moderadamente divergente y con un alto grado de coherencia espacial: esta coherencia es la razón por la que un haz láser se puede propagar a lo largo de largas distancias y se focaliza produciendo manchas de luz muy pequeñas.
- También tiene un alto grado de coherencia temporal, lo que equivale a una longitud de coherencia larga (intervalos de tiempo relativamente largos corresponden a largas distancias de propagación).
- Ancho de banda espectral estrecho, motivo por el que los haces de laser tienen un cierto colore puro, por ejemplo, rojo, verde o azul.

- La luz láser viaja con una velocidad de propagación definida y constante en un determinado medio.

Como consecuencia de estas propiedades, la luz láser es muy adecuada para la medición de objetos.

#### 1.2.4.3 Medir con la luz

Como ya se ha dicho antes hablando de las técnicas *image-based* y *range-based*, las dos técnicas que implementan la luz para el levantamiento arquitectónico son las técnicas pasivas y las técnicas activas.

Las técnicas pasivas no emiten radiación alguna y se basan en detectar la radiación ambiental reflejada; estos métodos pasivos pueden ser muy baratos porque en la mayoría de los casos no necesitan más hardware que una cámara digital. El problema con estas técnicas es que dependen de encontrar correspondencias entre imágenes 2D y los relativos datos 3D, lo que no siempre tiene una única solución, así que la precisión depende esencialmente de la resolución de las imágenes y de la densidad de elementos identificables en ellas (Lerma García & Biosca Tarongers, 2008).

El principio de funcionamiento de las técnicas de mediciones activas es emitir una radiación controlada y detectar su reflexión. Entonces, en este caso se requieren un transmisor laser y un receptor, así que estas técnicas implican un sistema de toma de datos más complejo.

Las principales ventajas de estos sistemas son:

- Posibilidad de operar también en ausencia de luz ambiental, porque el mismo instrumento el que genera su propia radiación;
- Restituir una gran cantidad de mediciones de manera semiautomática;
- Se puede capturar información también sobre superficies uniformes, sin rasgos distintivos, y/o complejas;
- Extrema velocidad de adquisición (hasta 1.000.000 puntos/s) que se traduce en un tiempo inferior en el sitio por los operadores y ahorro económico
- Permiten la obtención de un modelo 3D completo, la extracción de información métrica y los detalles de la construcción
- Reducción, o incluso la eliminación completa, de los costos de la vuelta en el sitio, con consecuente menor impacto en la logística. Esto se debe también al hecho de que el soporte topográfico no es necesario ya que el GPS, el sensor de inclinómetro y la brújula muchas veces están integrados y proporcionan información sobre el posicionamiento exacto de la estación láser (También es necesario decir que para tener un resultado completo y satisfactorio, lo ideal sería integrar la técnica del escáner láser y la de la estación total, con el fin de mantener una alta precisión global de la toma de datos, sin perder la ventaja en términos de Velocidad de adquisición).

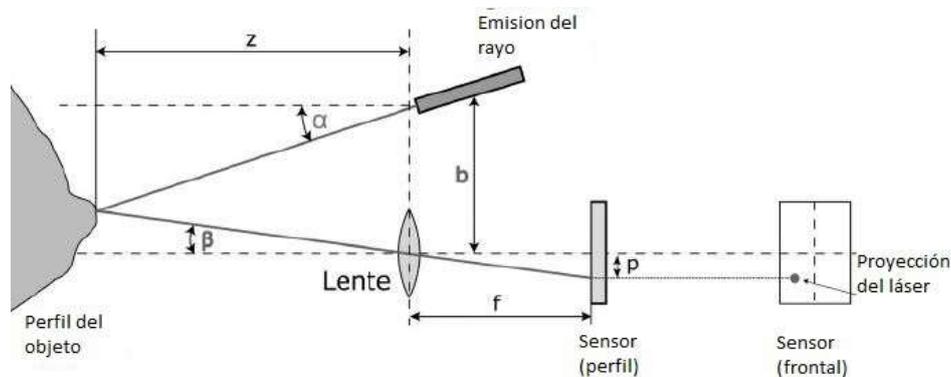
Existe un gran número de escáneres láser que se diferencian entre ellos en la manera en la que el escáner recibe y/o analiza la señal de radiación reflejada y en el principio en el que se basa la medida de la distancia (Lerma García & Biosca Tarongers, 2008).

### 1.2.4.3.1 Medición basada en triangulación

Un **escáner láser por triangulación** se basa sobre el mismo principio de la triangulación: un rayo láser es proyectado sobre el objeto a levantar y se emplea un sensor para buscar la localización de la proyección del mismo rayo láser. El emisor y el receptor están desplazados y se instalan con un ángulo constante creando un triángulo entre ellos y la proyección del láser sobre el objeto: de aquí el nombre de triangulación.

Analizando las figuras siguientes, se observa que la longitud del lado  $b$  del triángulo es conocida y es la distancia entre el sensor y el emisor láser (*baseline*); también el ángulo  $\alpha$  del emisor láser es conocido, entonces el ángulo  $\beta$  puede ser fácilmente determinado al conocer la ubicación del punto laser reflejado en él, conocida la distancia focal  $f$  y la posición  $p$  del punto proyectado (teorema de los ángulos opuestos:  $\tan \beta = \frac{p}{f}$ ).

Estos tres elementos determinan completamente la forma y el tamaño del triángulo y proporcionan la profundidad exacta del objeto medido.



**Imagen 9: Esquema de funcionamiento de un laser escáner de triangulación (Russo, Remondino, & Guidi, 2011).**

Se puede demostrar que, cuanto mayor es la dimensión  $b$ , menor es el error en la estimación de la profundidad del objeto; sin embargo, distancias muy grandes entre el emisor y el sensor reducen el campo de visión del sistema de toma y, entonces, la proyección del láser es difícilmente capturada por el sensor (Lerma García & Biosca Tarongers, 2008).

Para reducir la imprecisión en el levantamiento de la profundidad de los puntos se puede (Lerma García & Biosca Tarongers, 2008):

- Incrementar la base de triangulación, que también comporta un aumento de las sombras;
- Reducir la distancia del objeto al escáner, que además reduce el efecto de las sombras;
- Incrementar la distancia focal de la lente del sensor, pero consigue reducción del campo visual.

A causas de las limitaciones físicas de usar una base mayor y un campo de visión limitado, los escáneres por triangulación se usan en aplicaciones que generalmente requieren una distancia de uso menor de 2 metros.

### 1.2.4.3.2 Medición basada en tiempo

Los escáneres de medición basada en tiempo son escáneres que miden un intervalo de tiempo entre dos sucesos. En general, hay dos principios de funcionamiento diferentes: escáner láser por tiempo de vuelo (TOF) y escáner láser por diferencia de fase.

En los escáneres TOF y por diferencia de fase, un espejo prismático escanea verticalmente mientras que la rotación en el eje principal realiza un escaneo horizontalmente. A cada impulso corresponde una posición angular azimutal y cenital para proporcionar, por cada reflexión recibida, un trío de las coordenadas de la alfa, de theta, y de distancia.

#### Escáner láser por tiempo de vuelo (TOF - Time Of Flight)

En los sistemas por tiempo de vuelo, porque, como ya se ha dicho, la luz viaja con una velocidad finita y constante a través de un medio, es posible medir el tiempo empleado por la luz en el su recorrido (desde la fuente al objeto reflectante más el regreso desde el objeto a la fuente) e, indirectamente la distancia  $d$  recorrida por la luz:

$$d = \frac{c * t}{2}$$

dónde:  $c$  es la velocidad de la luz en el aire y  $t$  es el tiempo de vuelo de ida y vuelta del rayo láser.

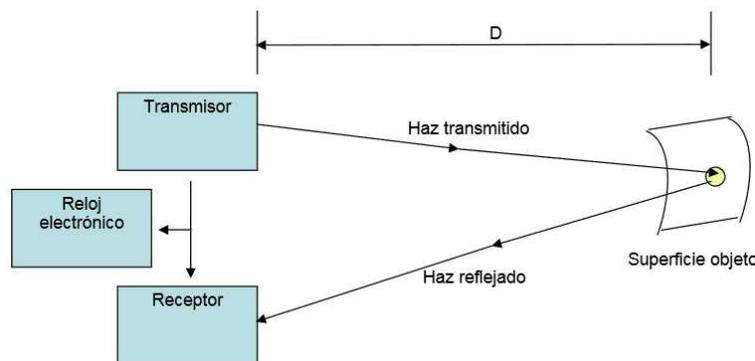


Imagen 10: Principio de funcionamiento de un escáner láser por tiempo de vuelo (Lerma García & Biosca Tarongers, 2008).

Los escáneres por tiempo de vuelo no suelen usar haces continuos, sino pulso de láser (la máxima frecuencia de pulso está determinada por el hecho de que el emisor no puede enviar un pulso hasta que no haya recibido el anterior para evitar la confusión en la llegada de los pulsos).

Un láser escáner 3D de este tipo permite de obtener una grande cantidad de puntos en poco tiempo (hasta 50.000 puntos por segundo) y permite su visualización *in situ*.

La precisión de la distancia depende directamente de la precisión del tiempo de vuelo sobre la que se refleja la presencia de ruido en la señal de vuelta, debido a causas ópticas y electrónicas (es importante destacar que el método derivado del tiempo para medir el retorno del pulso depende de la resolución del reloj interior para la medición directa de los intervalos de tiempo). Además, la precisión de estos sistemas de medidas depende de la fuerza de la señal, sensibilidad y resolución del sensor, capacidad de reproducción del emisor del pulso.

Estos sistemas son capaces de garantizar altas precisiones en mediciones de larga distancia (hasta varios centenares de metros). El inconveniente es el problema de detectar la exacta llegada de los retornos

dispersos del pulso y a las problemáticas de las tolerancias ópticas y de la atenuación atmosférica (Lerma García & Biosca Tarongers, 2008).

### Escáner láser por diferencia de fase

Este tipo de instrumentos, basados sobre una medición, esta vez indirecta, del tiempo, evitan el uso de relojes de alta precisión modulando la potencia del haz láser. La luz emitida es una radiación luminosa continua, modulada en amplitud, y enviada a la superficie a levantar; la reflexión, también si dispersa, se captura y un circuito mide la diferencia de fase entre las ondas enviada y recibida, y la relativa demora.

La característica fundamental de estos escáneres es la elevada densidad de datos adquiridos (hasta 0.6mm entre los puntos a una distancia de 10 metros) y la rápida velocidad de adquisición, por este motivo se suelen utilizar para aplicaciones dinámicas (sobre plataformas en movimiento: trenes, automóviles, etc.) (Cabrera Revuelta, 2017).

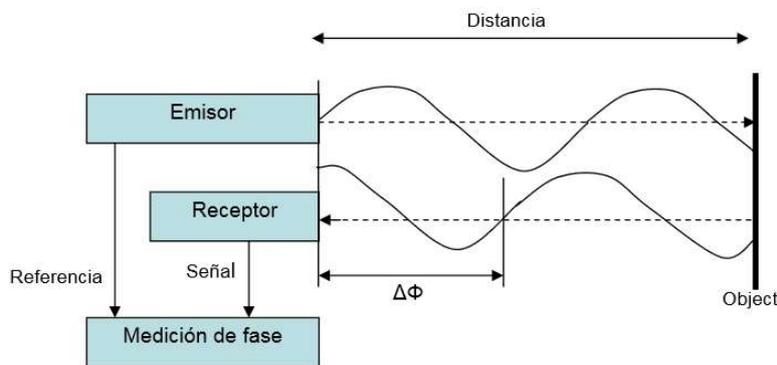


Imagen 11: Principio de funcionamiento de un escáner láser por diferencia de fase (Lerma García & Biosca Tarongers, 2008)

Los escáneres láser actuales están preparados para realizar rápidos estacionamientos de toma y para ser lo más eficientes posible.

Algunos llevan compensadores especiales de doble eje de modo que nivelan automáticamente el escáner; otros llevan receptores GPS y compensadores de inercia para realizar un posicionamiento y una orientación directa del escáner en el espacio. Algunos escáneres montan una cámara digital integrada que, tras la fase de adquisición de datos geométricos, se utiliza a través de procedimientos automáticos para la adquisición de imágenes del espacio detectado; las fotos así adquiridas serán posteriormente transformadas en un mosaico por el software de procesamiento de datos y aplicadas a las nubes puntuales para enriquecerlas con información de color.

La tecnología del escaneado láser está continuamente en desarrollo: dianas de referencia con receptores GPS integrados para evitar de registrarlas topográficamente con estaciones totales; filtrado de nubes de puntos por *hardware*; combinación de principios de funcionamiento (tiempo de vuelo y diferencia de fase) en un solo escáner, etc.

## 1.3 Sobre el levantamiento a través de escáner láser

### Nube de puntos

Esencialmente hoy hablar de levantamiento significa producir un modelo digital 3D, una toma de datos densa y precisa que representa la realidad con puntos de los que se conocen las coordenadas.

La nube de puntos, o sea un conjunto de puntos muy denso, es el resultado final del levantamiento: ésta representa un modelo tridimensional del objeto levantado donde se conocen las coordenadas de cada punto medido.

La nube de puntos es visible y analizada por un *software* específico y contiene toda la información obtenida con el levantamiento del escáner; esta permite:

- Visualizar el área levantada en 3D
- Medir distancia entre los puntos
- Hacer comparaciones entre modelos

Es posible, además, a partir de la nube de puntos generar un modelo *mesh* que conecte cada punto de medición con superficies triangulares, respetando la posición espacial.

La nube de puntos generada por el escáner laser se puede integrar con otras nubes de puntos 3D generadas por varias tecnologías, como por ejemplo la fotogrametría terrestre y georreferenciada.

### Registro

Por objetos complejos generalmente se necesitan varios estacionamientos del escáner, y de consecuencia se tendrán nubes de punto múltiples. Los diferentes escaneos son realizados desde diferentes puntos de vista y cada uno está en su propio sistema de referencia con origen en el centro del escáner láser. Para conseguir el modelo 3D es necesario orientar todas las nubes de puntos según un mismo sistema de referencia. Esta operación se llama registro, o alineación, de las nubes de puntos y es posible garantizando una oportuna zona de solape entre los escaneos adyacentes, de modo que es posible reconocer puntos comunes y efectuar una roto-traslación espacial. En general, el registro se realiza utilizando el *software* específico que facilite el fabricante del escáner.

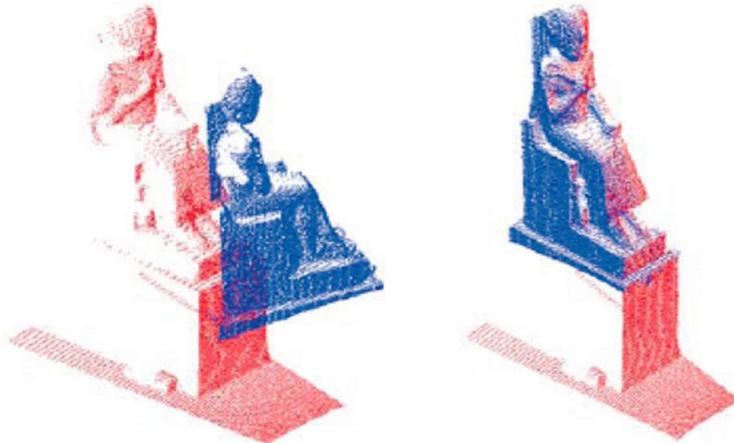


Imagen 12: Registro de dos nubes de puntos (MicroGeo , s.f.).

La determinación de los puntos comunes puede ser conseguida a través de técnicas indirectas o directas.

El registro indirecto conlleva el uso de *target* (artificiales o naturales) en el escenario para alinear las nubes de puntos. Si se necesita georreferenciar (georreferenciar significa alinear las nubes de puntos e insertar el conjunto de los datos en un sistema de coordenadas fijo) se deben medir los puntos de referencia mediante técnicas topográficas y transformarlos a un sistema de coordenadas “no local” conocido.

Para llevar a cabo el registro indirecto se necesita, como mínimo, tres puntos de referencia presentes en las dos nubes de puntos a registrar referencia (dos puntos de referencia si se escanea poniendo en burbuja el instrumento así que la tercera condición de vínculo común es asegurada por los ejes z verticales). Sin embargo, siempre es mejor tener más de tres puntos, ya que de esta manera los errores se pueden minimizar.

El registro directo significa que la posición y la orientación del escáner se calculan directamente. Esto se puede hacer de dos maneras: colocando un receptor GPS sobre el escáner o, en el caso de un escáner láser con algunas funciones de estación total, estacionando sobre un punto de coordenadas conocidas utilizando una plomada laser y, para conocer la orientación, adquirir un otro punto de referencia conocido.

### Procesamiento de nubes de puntos 3D

El procesamiento de una nube de puntos hace referencia a la transformación de la nube de puntos cruda registrada en un resultado final. El resultado final puede adoptar varios formatos: una simple nube de puntos limpiada, registrada y alineada; planos 2D vectoriales o ráster (planos, elevaciones, secciones, ortofotos, etc.); modelos 3D texturizados para animaciones y navegación.

Generalmente, el procesamiento de una nube de puntos 3D, se puede dividir en dos categorías. Los resultados finales se pueden extraer directamente de la nube de puntos sin más procesamiento, o creando primero un modelo 3D de la superficie a partir de la nube de puntos y extrayendo los resultados de este modelo.

El resultado de una captura de un escáner es una gran cantidad de puntos en el espacio, cada uno teniendo unas coordenadas X, Y, Z y, normalmente, un valor de reflectividad. Algunos escáneres proporcionan incluso información del color en forma de valores RGB (rojo, verde y azul).

Utilizando complejos algoritmos de modelización (triangulación), los puntos vecinos se pueden conectar para formar superficies; esto proporciona una representación más cercana a la realidad. Calculando la dirección normal de la superficie, se pueden también utilizar sombras artificiales para enfatizar detalles de la superficie.

Un primer paso en el proceso de mallado es la eliminación del ruido de los datos de la nube de puntos. Diferentes factores (viento, superficie de reflexión mala, entre otros) pueden introducir ruido en los datos tomados, y, como consecuencia, el modelo contendrá triángulos que conecten los puntos con ruido a los puntos correctos. Esto produce una malla llena de picos y, por tanto, es importante eliminar este ruido en el primer paso.

A menudo, el operador puede identificar fácilmente algunas partes escaneadas pero que no son necesarias en los resultados finales. Por tanto, es aconsejable que el operador lleve a cabo un primer análisis de la nube de puntos y elimine a mano todos los puntos no necesarios.

Uno de los principios en los que se basan los algoritmos automáticos que eliminan el ruido es el hecho de que los puntos que tengan pocos puntos o ninguno a su alrededor son considerados ruido. Probablemente son originados por personas y otros obstáculos que se mueven por delante del escáner mientras el escáner está funcionando. Estos puntos se identifican fácilmente utilizando un número limitado de parámetros de ajuste y, por tanto, eliminados de la nube de puntos.

También existen otros filtros de ruido, algunos especializados según el tipo de escáner, que eliminan puntos con errores sistemáticos. Por supuesto, se debe tener cuidado cuando se eliminan puntos ruidosos ya que pueden perderse entidades cuando se suaviza en exceso o cuando se eliminan demasiados puntos.

Cuando se crea una malla, el número de triángulos es más del doble del número de puntos; esta cantidad hace que sea difícil trabajar con programas estándar, entonces, generalmente se necesita reducir el número de triángulos antes de crear el modelo. Esta reducción de puntos se puede hacer de dos formas. La manera más fácil de reducir el número de puntos es eliminar un punto que esté muy cerca de otros puntos. Los puntos se pueden eliminar mientras que se mantiene toda el área escaneada. Sin embargo, esta técnica puede eliminar puntos en áreas que contengan elementos importantes y, por tanto, que se elimine información valiosa. Otra forma de eliminar puntos es teniendo en cuenta la curvatura de la superficie para determinar si parte de la superficie es suave o muy curva. Esta técnica de remuestreo funciona inteligentemente, manteniendo los puntos importantes en las áreas con alta curvatura y eliminando puntos en áreas que se pueden representar con menor cantidad. Con esta técnica se consigue una reducción más adecuada de la nube de puntos original sin perder elementos valiosos.

### Modelado 3D

Generalmente, el producto final de un proceso de modelado 3D es una malla de la superficie del objeto. Conectando todos los puntos de la nube con pequeños triángulos, se genera un modelo de superficie o malla. Esta malla es una interpolación de los puntos tridimensionales creando una representación completa de la superficie.

Existen diferentes algoritmos para crear mallas a partir de nubes de puntos. Las conexiones entre puntos se realizan normalmente mediante triángulos o cuadriláteros. La técnica de modelización con triángulos y tetraedros más popular es la del criterio de Delaunay: este criterio establece que ningún punto puede estar contenido en la esfera circunscrita en cualquier tetraedro del modelo.

Además, aunque la nube de puntos se haya reducido durante el remuestreo para crear un menor número de triángulos, puede ser necesario reducir el número de triángulos de la malla en un segundo paso para superar las capacidades del *hardware*. Esto se llama diezmado de la malla.

### Modelado 2D

Un modelado 2D directo se obtiene directamente de las nubes de puntos a través de programas CAD: un interfaz especial permite al usuario cargar grandes nubes de puntos en estos programas para procesarlos con las herramientas CAD estándar. Luego el usuario tiene que dibujar manualmente o conectar los puntos creando líneas, arcos, etc. El usuario hace una interpretación de las esquinas y detalles más pequeños que la resolución del escáner. Esto es una tarea difícil y precisa que puede llevar un tiempo considerable y la persona que lleve a cabo esta tarea debe tener un conocimiento del edificio o estructura o tener material fotográfico a su disposición para hacer las interpretaciones

correctas. Entonces, se puede decir que hacer modelos 2D directamente de las nubes de puntos es una cuestión de interpretación humana.

En cambio, el modelado 2D indirecto significa que se pueden obtener dibujos 2D a partir de objetos 3D modelados: una vez se ha creado un modelo, se puede cortar por planos para crear secciones transversales. La interpolación de áreas entre puntos medidos se hace de manera automática en la fase de modelado y no requiere que sea realizada por un operador.

### Control de calidad

La calidad de los levantamientos mediante escáneres láser necesita una consideración cuidadosa durante todo el proceso de medición y procesamiento. Cada vez que se estaciona el escáner para tomar datos (antes, durante y después) ciertos elementos de los datos deberían inspeccionarse y contrastarse con los resultados esperados o predichos. La calidad empieza con un completo conocimiento de las especificaciones del proyecto. Este conocimiento permite la correcta elección del escáner, la correcta resolución, el método apropiado de registro, etc. Por ejemplo, elegir un escáner que no tiene suficiente alcance, sin usar las dianas necesarias ni los emplazamientos correspondientes, no permitir un solape apropiado para registrar los escaneados utilizando el recubrimiento, y lo más importante, si la resolución no es la correcta, todo ello afectará directamente en la calidad del producto final. Además, la documentación adecuada en campo asegura que los datos se archiven con calidad óptima. Los croquis de apoyo, las fotografías de referencia y las comprobaciones de diversas dimensiones podrán utilizarse en futuras fases del proceso.

### Gestión de los datos

La gestión de datos, como ya se ha dicho en un apartado precedente, debe ser considerada cuando empieza la planificación del levantamiento. Un escáner láser captura miles de puntos por segundo y, por tanto, los conjuntos de datos se hacen muy grandes en poco tiempo. Por esto, se necesita un equipo capaz de almacenar, procesar y archivar los datos.

Entre los formatos de fichero más comunes para almacenar los datos de un escáner láser, algunos solo contienen la información del punto (coordenadas x, y, z), mientras otros añaden más información como el color o la reflectividad, las normales de los puntos, la posición del escáner, etc.

Los formatos más comunes para el almacenamiento de nubes de puntos son (Lerma García & Biosca Tarongers, 2008):

- DXF: formato de AutoCAD
- PTX: formato de texto ordenado de Leica que contiene las coordenadas xyz, la reflectividad y el color. Algunas veces también contiene la posición del escáner.
- PTS: formato de texto no ordenado de Leica que contiene las coordenadas xyz, la reflectividad y el color.
- XYZ: formato de texto no ordenado que contiene las coordenadas xyz.
- XYZRGB: formato de texto no ordenado que contiene las coordenadas xyz y los valores de color (RGB) para cada punto.

Como el escáner láser captura grandes cantidades de datos, se toman muchos más puntos de los realmente necesarios; si bien éstos pueden utilizarse más tarde. Por lo tanto, es muy importante archivar los datos y mantenerlos accesibles por un largo periodo de tiempo. El hecho de archivar datos se ha convertido, en sí mismo, en un problema importante.

Cuando se archiva, es muy importante añadir metadatos para saber qué es lo que se ha escaneado y cómo se ha almacenado o procesado (metadatos del escaneado; metadatos del proyecto; informaciones del registro; informaciones de apoyo).

## 1.4 Software

En este apartado se quiere dar alguna información básica sobre las herramientas utilizadas en este trabajo.

### 1.4.1 UCL Depthmap<sup>2</sup>

UCL Depthmap es un *software* de análisis de redes espaciales diseñado para comprender los procesos sociales dentro de un entorno construido. Esta herramienta trabaja en diferentes escalas, desde espacios arquitectónicos hasta una entera región; en cada escala el objetivo es producir un mapa de los elementos espaciales, conectarlos a través de alguna relación y luego realizar un análisis del grafo resultante. Por ejemplo, en una escala arquitectónica, Depthmap se puede utilizar para evaluar la accesibilidad visual de un punto a través de la construcción de la isovista correspondiente, o sea la región visualmente accesible desde esta localización (UCL, s.f.).

### 1.4.2 Software de procesamiento de nubes de puntos.

Muchos son los programas que permiten la importación de datos de escáner láser o datos de nubes de puntos para su preprocesamiento en modelado 3D.

- **Leica Geosystems HDS Cyclone** es un *software* de procesamiento de nubes de puntos que proporciona una gran cantidad de opciones de procesos de trabajo para proyectos de escaneo láser 3D en aplicaciones de ingeniería, construcción, topográficas y similares. Los diversos módulos Cyclone ayudan al usuario de principio a fin en proyectos de nubes de puntos de todo tipo. Existen módulos que permiten aprovechar operaciones de recopilación de datos de campo de los escáneres láser de Leica Geosystems, como mediciones poligonales, lectura de espalda e intersección inversa para la recopilación y el registro de datos de nivel topográfico. Esto incluye rutinas de automatización que realizan todo el trabajo por el usuario como el control de calidad y el ajuste topográfico. Existen otros módulos dedicados a generar gran cantidad de resultados, desde informes a mapas y modelos 3D, animaciones, y formatos de datos 3D ligeros que se pueden distribuir libremente a través de la red. Estos módulos son idóneos para una gran variedad de sectores y flujos de trabajo, como la ingeniería civil, los modelos 3D *as-built*, los levantamientos topográficos, los modelos BIM y mucho más (Leica Geosystem, s.f.).
- **ReCap de Autodesk** es una herramienta que permite crear modelos 3D a partir de escaneos láser y fotometría, con un flujo de trabajo optimizado. Recap dispone de dos entornos:

---

<sup>2</sup> Depthmap es gratis para uso académico. El *software* está para convertirse en una fuente abierta. Para obtener información completa: <https://github.com/varoudis/depthmapX>

Autodesk Recap Studio, que sirve para hacer más fácil la limpieza, organización y visualización de grandes conjuntos de datos capturados de la realidad, y Autodesk Recap Photo, con el que se puede crear modelos 3D con texturas a partir de fotografías, gracias al poder de la computación en la nube (Autodesk, s.f.).

## 2 JUSTIFICACIÓN

Con este trabajo se quiere contestar a la siguiente pregunta: “¿Cuáles y cuántos son los mejores posicionamientos desde los cuales realizar una toma de datos geométricos a través de un escáner láser?”.

Como ya mencionado antes, una buena planificación del levantamiento arquitectónico garantiza un levantamiento de calidad y puede influir de forma positiva en diferentes aspectos:

- Reducción del tiempo de realización del trabajo y, como consecuencia, del coste del mismo. Racionalizar el número de estacionamientos es importante porque cada nuevo posicionamiento implica mover el equipo de trabajo y hacer un nuevo procedimiento de estacionamiento (montar el trípode, sujetar el escáner al trípode, nivelar el escáner, etc.). Además, con una buena planificación del levantamiento se reducen los riesgos en la fase del trabajo de campo porque previamente se analizan las peculiaridades y los eventuales problemas relativos al objeto a levantar.
- Mejor calidad de los datos obtenidos. Analizando previamente los posicionamientos del escáner laser se puede reducir el riesgo de obtener medidas no precisas (por ejemplo, se pueden evitar problemas relativos a rayos láser tangentes).
- Toma de datos completa y no redundante. Con una previa planificación del levantamiento es posible controlar que toda el área de interés esté totalmente levantada, garantiendo un adecuado solape entre los diferentes escaneados y, al mismo tiempo, evitando de adquirir datos sobreabundantes y no necesarios.
- Post-procesado más rápido y eficiente.

### 2.1 Justificación de competencia

Con el trabajo realizado se desarrollan las siguientes competencias:

- Capacidad de organización y planificación
- Capacidad para la resolución de problemas
- Capacidad para tomar decisiones
- Capacidad de análisis y síntesis
- Capacidad de gestión de la información

- Capacidad para el razonamiento crítico
- Capacidad de improvisación y adaptación para enfrentarse a nuevas situaciones
- Actitud social positiva frente a las innovaciones sociales y tecnológicas
- Capacidad de razonamiento, discusión y exposición de ideas propias
- Capacidad de comunicación a través de la palabra y de la imagen
- Capacidad de búsqueda, análisis y selección de la información
- Capacidad para el aprendizaje autónomo
- Transmitir información, ideas, problemas y soluciones a un público tanto especializado como no especializado
- Presentación y defensa ante un tribunal universitario de un proyecto fin de grado, consistente en un ejercicio de integración de los contenidos formativos recibidos y las competencias adquiridas.

### 3 OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es la utilización de una herramienta, en este caso Depthmap, que, aunque está pensada para otras finalidades, puede ser utilizada para facilitar el proyecto de levantamiento de un espacio interior y, en particular, ayudar al profesional del sector en la determinación de los mejores posicionamientos desde los cuales ejecutar la toma de datos a través de un escáner láser.

Generalmente en un espacio interior, para definirlo, se utilizan límites que pueden ser dinámicos (puertas) o estáticos (paredes), transparentes (ventanas, cristalerías) u opacos. Una vez definidos, estos límites proporcionan un espacio y determinan hacia dónde se puede desplazar (accesibilidad) y qué se puede ver (visibilidad). Accesibilidad y visibilidad son características que influyen directamente en la percepción del espacio arquitectónico.

Con el fin de localizar los posicionamientos mejores del escáner láser, Depthmap puede ser utilizado para obtener información fácilmente cuantificable sobre la especialidad de una obra arquitectónica y para conocer la complejidad y la singularidad de un espacio interior.

Específicamente en este trabajo se persiguen los siguientes objetivos:

- Analizar las distintas técnicas e instrumentos para la realización de un levantamiento arquitectónico.
- Analizar las distintas herramientas de Depthmap para comprender su potencial y las limitaciones, aprender procedimientos generales y seleccionar los indicadores de este *software* útiles para la definición de un proyecto de levantamiento.
- Elegir un espacio interior, de interés histórico y cultural, cuya planta puede ser adaptada al desarrollo de este trabajo y poner en práctica las herramientas del *software* estudiadas anteriormente.
- A partir de los resultados del análisis en Depthmap, ejecutar el levantamiento y la toma de datos.
- Verificar que la toma de datos ejecutada sea completa y comprobar la efectiva utilidad del *software* para conseguir la optimización en el posicionamiento para la realización del levantamiento arquitectónico.

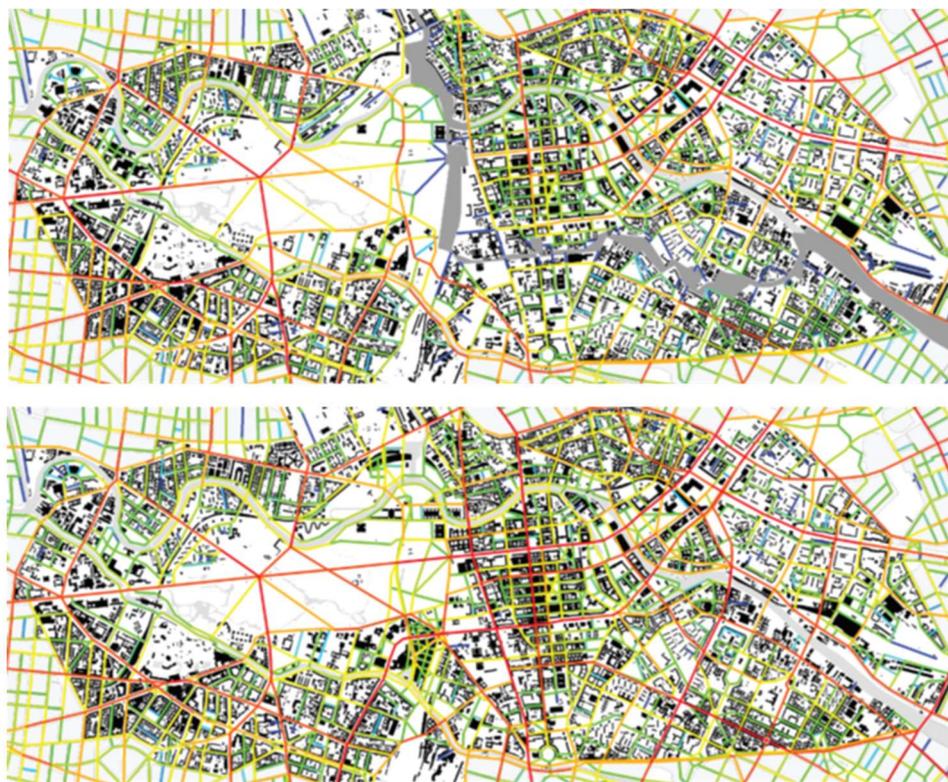
## 4 METODOLOGÍA

### 4.1 Marco teórico

Para conseguir la optimización de los posicionamientos en un levantamiento arquitectónico en este trabajo se utiliza Depthmap, un *software* diseñado para realizar un análisis de visibilidad de sistemas arquitectónicos y urbanos y comprender el espacio construido.

En cada escala, Depthmap recibe en *input* el plan del sistema, construye un mapa de los elementos espaciales, conectados a través de alguna relación (por ejemplo, intervisibilidad o superposición) y realiza una serie de análisis de configuración que se encuentran bajo el término de “*space syntax*” que examina y muestra las relaciones entre los componentes del espacio.

Cada análisis empieza con una representación de los componentes espaciales y luego hace un gráfico de estos componentes y, por último, analiza este gráfico.



**Imagen 13: Integración espacial de Berlín en 1989 y 2010. Anna Rose and Christian Schwander at Space Syntax Limited (Space Syntax Network ).**

En este capítulo se procede a explicar los conceptos originales detrás el desarrollo del *software* Depthmap.

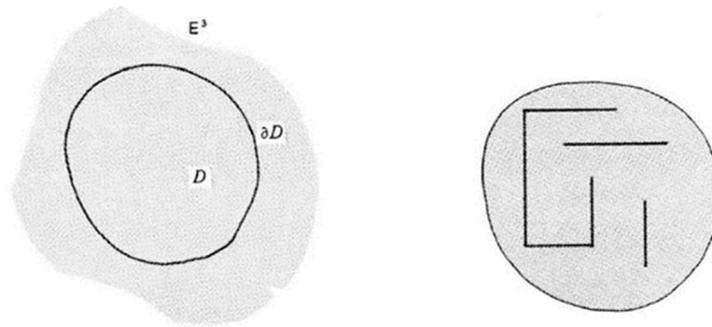
#### 4.1.1 *Background* detrás de Depthmap

*“Comprender un espacio, saber cómo ver, es la clave para entender una construcción”* (Zevi, 1957).

El concepto original detrás de Depthmap se desarrolló a partir de dos líneas de pensamientos: el análisis isovista (Benedikt, 1979) y la sintaxis espacial (Hillier y Hanson, 1984). (Turner A. , Depthmap 4 — A Researcher’s Handbook, 2004)

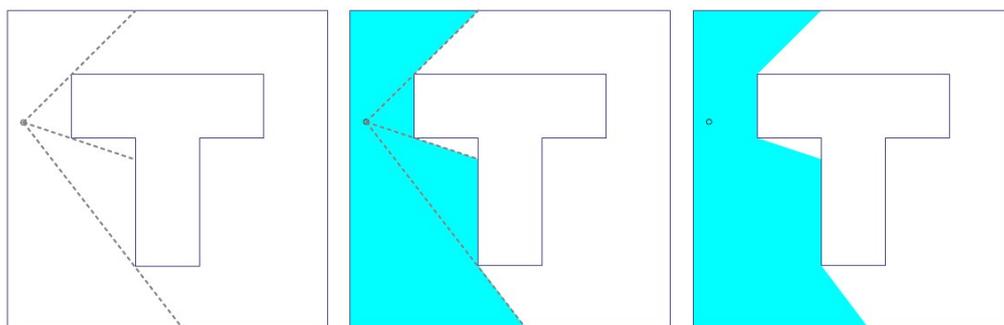
Benedikt creó mapas de propiedades del campo visual de puntos dentro de planes de edificios: partiendo de la planta de un espacio arquitectónico y fijando una precisa posición en esta, la isovista correspondiente es la región plana visible a partir desde esta localización (Abajo & Delgado), o sea, es el conjunto de todos los puntos visibles desde un punto de vista determinado en el espacio y con respecto a un entorno (Benedikt, 1979).

Según Benedikt, describir un entorno en términos de la posición de sus superficies reales en  $D$  es completamente equivalente a describirlo por el conjunto de todas las isovistas posibles correspondientes a todos los puntos  $x$  en  $D$  (Benedikt, 1979).



**Imagen 14:** En un espacio euclídeo  $E^3$ , sea  $D$  una región simplemente conectada, delimitada por la frontera  $\partial D$ . En  $D$ , un entorno visual  $E$  está definido como el conjunto de superficies reales, teniendo en cuenta su condición espacial (Benedikt, 1979).

Dibujando las isovistas sobre la planta, se realiza un mapa que das una idea de qué puede ver un individuo moviéndose en un espacio y de cómo lo percibe este espacio. (Abajo & Delgado)



**Imagen 15:** Ejemplo de isovista generada desde una localización en una sencilla planta cuadrada con obstáculo central en forma de “T” (Abajo & Delgado).

Para cuantificar esta experiencia visual de un observador, Benedikt sugiere que no es suficiente considerar las isovistas de forma aislada, sino que es fundamental estudiar la interrelación entre isovistas asociadas a diferentes posiciones porque el campo visual de un observador va cambiando, en forma y tamaño, cuando él se mueve.

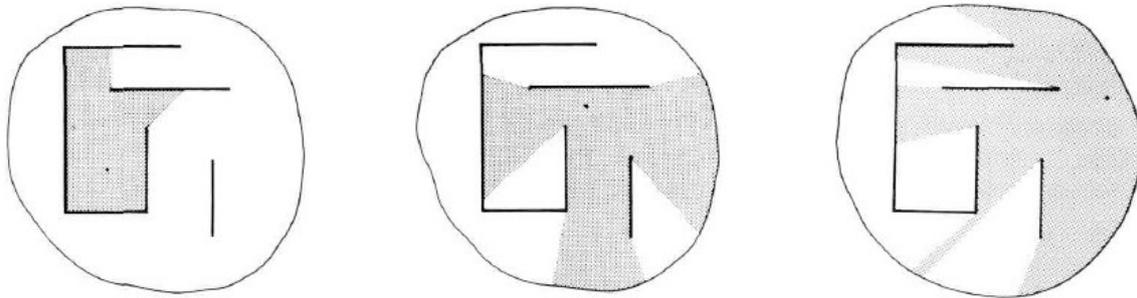


Imagen 16: Tres diferentes isovistas (Benedikt, 1979)

Independientemente, Hillier y Hanson desarrollaron la teoría de la sintaxis espacial: ellos crearon varias representaciones para las componentes de un espacio y dibujaron mapas de estos componentes y representaron las relaciones entre estas. En particular, Hillier y Hanson crearon un gráfico usando líneas axiales como nodos, de modo que cada línea se consideraba conectada a otras que intersecaba. A partir de este gráfico, calcularon cuanto integrada estaba cada línea con respecto a todas las demás en el gráfico, es decir, calcularon una medida del número medio de pasos necesarios para pasar de una línea a otra dentro de este mapa axial. (Turner A. , Depthmap 4 — A Researcher's Handbook, junio 2004)

A partir de estos dos conceptos, se decidió combinar campos de isovistas con la sintaxis del espacio.

Más tarde (2001), Turner y otros formalizaron una metodología más amplia que, partiendo del concepto de isovista y utilizando un conjunto de técnicas de representación gráfica basada sobre la teoría de grafos, desemboca en la que es llamada **análisis del grafo de visibilidad** del espacio arquitectónico (**VGA: visibility graph analysis**). (Abajo & Delgado)

En el *visibility graph analysis*, una malla de puntos se superpone sobre el plano. Un gráfico se compone de puntos, donde cada punto está conectado a todos los otros puntos que puede ver. La integración visual de un punto se basa en la cantidad de pasos visuales que se necesitan para llegar desde ese punto a cualquier otro punto dentro del sistema.

Se pueden hacer diferentes mediciones del gráfico, no solamente la integración: la idea era que todas las posiciones que se pueden ocupar dentro de un espacio construido serían categorizadas por sus relaciones visuales con otros puntos ocupables a través de un mapa continuo. Por eso se formuló la hipótesis que el VGA daría una buena indicación de cómo las personas podrían interactuar con un espacio, moviéndose en esto o simplemente ocupándolo.

Depthmap fue la herramienta diseñada para realizar este análisis.

### 4.1.2 Teoría de grafos

En el párrafo anterior se he hablado de la Teoría de Grafos que está detrás de las técnicas de representación gráfica en Depthmap; aquí se intenta dar algunas de las nociones principales de esta materia.

La Teoría de Grafos, una materia relativamente reciente, está en una rama de las matemáticas y las ciencias de la computación que, utilizando el término inglés, se llama *Operation Research* que trata de la optimización de un cualquiera problema bastante complejo a través de algoritmos creados a propósito.

Formalmente, un grafo  $G = (V, E)$  es una pareja ordenada en la que  $V$  es un conjunto no vacío de vértices y  $E$  es un conjunto de aristas.

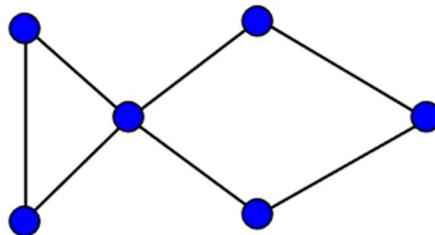


Imagen 17: Ejemplo de grafo.

En particular, la Teoría de los Grafos se ocupa del estudio de estos objetos discretos que permiten esquematizar una gran variedad de situaciones y procesos y, muchas veces, permiten el análisis en términos cuantitativos y cualitativos. Además, la Teoría de Grafos opera a través de la visualización gráfica de vértices, aristas y flujos. El ejemplo más llamativo de grafo es la red de carreteras, donde las intersecciones son los vértices y las carreteras son las aristas. También se puede describir la posibilidad de un tramo de carretera para soportar un cierto número de vehículos a través de la capacidad de flujo máximo variable. En cambio, se habla simplemente de flujo cuando se quiere describir el número de unidades (en este caso, vehículos) que pasan en el tramo en el tiempo  $t$ .

También una molécula química puede representarse como un grafo donde los vértices son los átomos que la componen y las aristas, los enlaces entre estos átomos.

#### 4.1.2.1 Un poco de historia

En el siglo XVIII, el primer texto que considera los grafos como entidades matemáticas es la publicación de Euler sobre los “siete puentes de Königsberg”, donde por la primera vez se trata de un problema de geometría topológica que no depende de ninguna medida: el problema de los puentes de Königsberg.

Luego, en 1847, Gustav Kirchhoff utilizó la Teoría de Grafos para el análisis de redes eléctricas publicando sus leyes de los circuitos para calcular el voltaje y la corriente en los circuitos eléctricos, conocidas como leyes de Kirchhoff, considerado la primera aplicación de la Teoría de Grafos a un problema de ingeniería.

En 1852 Francis Guthrie planteó el **problema de los cuatro colores**, el cual afirma que es posible, utilizando solamente cuatro colores, colorear cualquier mapa de países de tal forma que dos países

vecinos nunca tengan el mismo color. Este problema, que no fue resuelto hasta un siglo después por Kenneth Appel y Wolfgang Haken en 1976, puede ser considerado como el nacimiento de la teoría de grafos. Al tratar de resolverlo, los matemáticos definieron términos y conceptos teóricos fundamentales de los grafos.

El primer libro sobre la Teoría de Grafos fue escrito por Dénes Kőnig e publicado en 1936. (Tutte, 2001)

En la segunda mitad del siglo XX, los estudios y resultados se desarrollaron ampliamente, en línea con los fuertes desarrollos de la combinatoria y el cálculo automático. La introducción de la computadora ha permitido, por un lado, el desarrollo de investigaciones experimentales en gráficos (como, en particular, en la demostración del **teorema de los cuatro colores**) y por otro ha requerido la teoría del gráfico para investigar algoritmos y modelos de gran impacto aplicación.

En el espacio de cincuenta años, la Teoría de Grafos se ha convertido en un capítulo muy desarrollado de las matemáticas, rico en resultados profundos y con fuertes influencias aplicativas.

#### 4.1.2.1.1 Problema de los puentes de Königsberg

El origen de la Teoría de Grafos está en el problema de los puentes de Königsberg: Königsberg (hoy llamada Kaliningrado, en Rusia) es atravesada por el río Pregel, el cual se bifurca para rodear con sus brazos a la isla Kneiphof, dividiendo el terreno en cuatro regiones distintas, las que entonces estaban unidas mediante siete puentes.

Dicho problema consistía en encontrar un camino que recorriera los siete puentes del río Pregel de modo que se cruza cada puente una sola vez.

A lo largo de los siglos, más veces se ha planteado la cuestión y, en 1736, Leonhard Euler abordó este problema, demostrando que no existe una ruta con las características deseadas.

Con el su trabajo "*Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis*" (La solución de un problema relativo a la geometría de la posición) (Euler, 1736), tiene el mérito de haber formulado el problema en términos de teoría de grafos, abstrayendo de la situación específica de Königsberg: en primer lugar, eliminó todos los aspectos contingentes, excepto las área urbanas delimitadas por lo brazos fluviales y los puentes que los conectan; en segundo lugar, reemplazó cada área urbana con un punto, ahora llamado vértice o nodo, y cada puente con un segmento de línea, llamado arista.

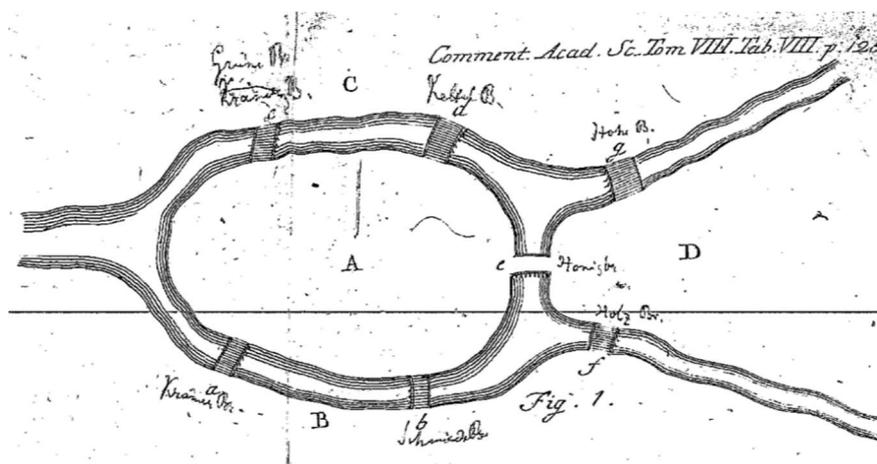


Imagen 18: Esquema del plano de Königsberg (Euler, 1736).

En su publicación Euler demuestra una solución generalizada del problema, que puede aplicarse a cualquier territorio en que ciertos accesos estén restringidos a ciertas conexiones, tales como los puentes de Königsberg.

Euler determinó, en el contexto del problema, que los puntos intermedios de un recorrido posible necesariamente han de estar conectados a un número par de líneas. En particular, en este diagrama los cuatros vértices están conectados con un número impar de líneas incidentes, por eso es imposible definir un camino con las características buscadas que son los siete puentes de Königsberg.

Esta abstracción del problema ideada por Euler dio pie a la primera noción de grafo: una estructura de datos donde los puntos se llaman vértices y a las líneas aristas. Al número de aristas incidentes a un vértice corresponde el grado de dicho vértice.

En la Teoría de Grafos, existe un concepto llamado ciclo euleriano, llamado así justamente en honor a Leonhard Euler, que representa cualquier camino dentro de un grafo particular, capaz de recorrer todas las aristas una única vez, regresando finalmente al mismo vértice original. Un ejemplo de grafos euleriano es la estrella de David.

#### 4.1.2.1.2 Teorema de los cuatros colores

En la Teoría de Grafos, el teorema de los cuatro colores es un teorema sobre la coloración de grafos que establece lo siguiente:

“Dado cualquier mapa geográfico con regiones continuas, este puede ser coloreado con cuatro colores diferentes, de forma que no queden regiones adyacentes con el mismo color”.

El problema del mapa de cuatro colores fue planteado, por primera vez, por el estudiante Francis Guthrie en 1852 y fue resuelto gracias a un complejo algoritmo informático, a mediados de 1970, por Kenneth Appel y Wolfgang Haken, dos matemáticos de la Universidad de Illinois (Fritsch & Fritsch, 1998).

El teorema de cuatro colores fue demostrado con la ayuda de un ordenador. Sin embargo, la demostración no es aceptada por todos los matemáticos dado que sería impracticable por su gran cantidad de detalles, de manera que una persona se vería imposibilitada para verificarlo manualmente. Solo queda aceptar la exactitud del programa, del compilador y del computador en el cual se ejecutó la prueba.

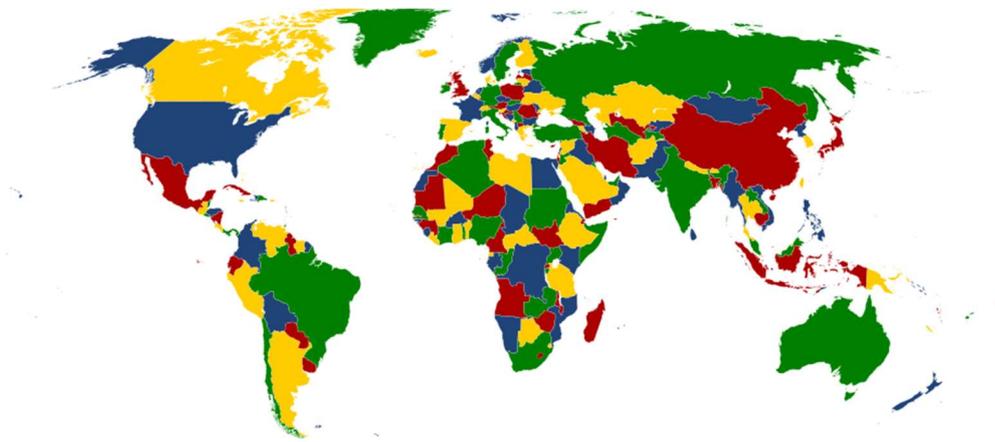
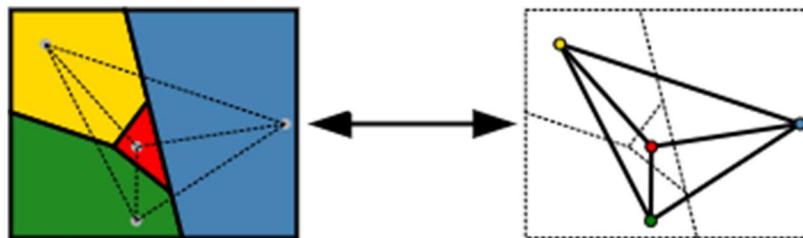


Imagen 19: Mapa del mundo coloreado de verde, amarillo, azul y rojo.

Una versión más simple del teorema utiliza la Teoría de Grafos (Gonthier, 2008). El conjunto de las regiones de un mapa se puede representar de manera más abstracta como un grafo simple no dirigido asociando un vértice para cada región y una arista para cada par de regiones que comparten un segmento de borde (la forma precisa de cada país no importa; lo único relevante es saber qué país toca a qué otro). Esta representación del mapa con vértices y aristas es un grafo dual y el problema de colorear países se cambia por la coloración del grafo. Este grafo es plano, o sea, que se puede dibujar en el plano sin cruce de aristas mediante la colocación de cada vértice en un lugar elegido arbitrariamente dentro de la región a la que corresponde. Entonces la cuestión equivale a atribuir a cada vértice un color distinto del de sus vecinos.

El teorema de cuatro colores establece que los vértices de cada grafo plano pueden ser coloreados con un máximo de cuatro colores de modo que no existan dos vértices adyacentes con el mismo color.



**Imagen 20: Mapa y grafo dual asociado.**

#### 4.1.2.2 Mas sobre los grafos

Un grafo es una estructura que consiste en:

- Objetos simples llamados vértices o nodos; cada uno lleva asociada una valencia característica según la situación, que se corresponde con la cantidad de aristas que confluyen en dicho vértice.
- Enlaces entre vértices, o sea el conjunto de aristas, que pueden tener dirección, representada gráficamente por una flecha (en este caso se habla de grafo orientado o dirigido), o pueden ser sin dirección añadida (en este caso se habla de grafo no orientado).
- Cualquier información asociada con nodos y/o aristas; un grafo ponderado es un ejemplo de un grafo en el que un valor numérico, llamado "peso", está asociado a cada arista.

Un grafo simple es aquel que acepta una sola arista entre dos vértices; si acepta más de una arista entre dos vértices se llama multigrafo.

El grado de un vértice es el número de aristas incidentes en lo mismo.

Existen diferentes formas de representar un grafo, además de la geométrica y muchos métodos para almacenarlos en una computadora. La estructura de datos usada depende de las características del grafo y el algoritmo usado para manipularlo. Entre las estructuras más sencillas y usadas se encuentran las listas y las matrices, aunque frecuentemente se usa una combinación de ambas.

## Aplicaciones

Gracias a la Teoría de Grafos se pueden resolver diversos problemas como por ejemplo la síntesis de circuitos secuenciales, contadores o sistemas de apertura. Se utiliza para diferentes áreas, por ejemplo, dibujo computacional, en todas las áreas de Ingeniería.

Los grafos se utilizan también para modelar trayectos como el de una línea de autobús a través de las calles de una ciudad, en el que podemos obtener caminos óptimos para el trayecto aplicando diversos algoritmos.

Para la administración de proyectos, se utilizan técnicas como de revisión y evaluación de programas en las que se modelan los mismos utilizando grafos y optimizando los tiempos para concretar los mismos.

Una importante aplicación de la teoría de grafos es en el campo de la informática, ya que ha servido para la resolución de importantes y complejos algoritmos.

La teoría de grafos también ha servido de inspiración para las ciencias sociales, en especial para desarrollar un concepto no metafórico de red social que sustituye los nodos por los actores sociales y verifica la posición, centralidad e importancia de cada actor dentro de la red. Esta medida permite cuantificar y abstraer relaciones complejas, de manera que la estructura social puede representarse gráficamente.

Se emplea en problemas de control de producción, para proyectar redes de ordenadores, para diseñar módulos electrónicos modernos y proyectar sistemas físicos con parámetros localizados (mecánicos, acústicos y eléctricos).

Se usa para la solución de problemas de genética y problemas de automatización de la proyección.

Los grafos son importantes en el estudio de la biología y hábitat.



Imagen 21: Mapa de metro.

## 4.2 Proceso de trabajo

- Estudios previos

Este trabajo se ha desarrollado a partir de la línea de investigación de la Tesis Doctoral de la profesora Elena Cabrera Revuelta, realizada en el año 2017 y denominada *Optimización en el posicionamiento para la realización de un levantamiento arquitectónico* (Cabrera Revuelta, 2017). En ésta se encuentran diferentes estudios:

- Estudios sobre las técnicas e instrumentos que se utilizan para la realización de un levantamiento arquitectónico con el fin de conocer las técnicas e instrumentos que se utilizan en la actualidad, así como para conocer las distintas recomendaciones existentes para la planificación de un trabajo de levantamiento arquitectónico;
- Estudios, dentro de la Geometría computacional, sobre los Problemas de Visibilidad y las distintas variantes de lo mismo.

El resultado obtenido con ese trabajo fue la obtención de un método de optimización en el posicionamiento para la realización de un levantamiento arquitectónico, que sirve a los profesionales de la Topografía, la Ingeniería y la Arquitectura para la toma de decisiones con respecto a qué puntos de vista escoger para garantizar una correcta toma de datos geométricos de un edificio.

Tras la exposición detallada de este método, el mismo fue puesto en práctica sobre un edificio existente: el Molino de Marea del Río Arillo, situado en el límite entre los municipios de Cádiz y San Fernando.

En ese caso, el levantamiento arquitectónico y la optimización de los posicionamientos del escáner láser fueron referidos a un espacio exterior. Precisamente con referencia a este aspecto se decidió empezar un trabajo sobre la optimización en el posicionamiento del escáner láser para el levantamiento de un espacio, esta vez, interior.

El proceso de investigación se ha desarrollado por un lado realizando una búsqueda de bibliografía relacionada y, por otro lado, estudiando y empleando en concreto el *software* Depthmap, una herramienta para el análisis topológico.

- Revisión Bibliográfica.

En primer lugar, el trabajo de investigación se ha empezado con una revisión bibliográfica en dos vertientes:

- por un lado, una búsqueda bibliográfica relacionada con las técnicas de levantamiento arquitectónico, con el fin de conocer las técnicas e instrumentos que se utilizan en la actualidad, así como para conocer las distintas recomendaciones existentes para la planificación de un trabajo de levantamiento arquitectónico, con particular referencia a las técnicas *range-based*, que utilizan escáneres laser para la toma de datos;
- por otro lado, una búsqueda bibliográfica relacionada con la Teoría de Grafos que está detrás a la representación gráfica en Depthmap.

Además, se ha llevado a cabo el estudio de las herramientas disponibles en Depthmap y de sus principales indicadores con el fin de utilizar este software lo más correctamente posible para conseguir los objetivos establecidos.

- Elección caso de estudio

Como caso de uso se ha elegido el Pabellón Mudéjar, en el que ahora se encuentra el Museo de Artes y Costumbre Populares de Sevilla, construido por el arquitecto Aníbal González como parte del conjunto de Plaza América para la exposición Iberoamericana de 1929.

La elección de este edificio fue dictada por su valor de interés histórico y cultural; además, el espacio del vestíbulo y del patio en la planta principal del edificio, que ha sido en concreto el objeto del levantamiento, ha resultado idóneo, con relación a los resultados que se querían conseguir, para la presencia de las columnas (elementos que definen el espacio y, al mismo tiempo, representan un obstáculo para la toma de datos a través del escáner láser) y para la su complejidad espacial.

Para poder acceder al Museo fue necesaria la autorización de la Consejería de Cultura.

- Planificación del itinerario de levantamiento

Realizando en Depthmap un análisis de visibilidad de la planta de dicho espacio, se ha obtenido un conjunto de posicionamientos desde los cuales ejecutar la toma de datos a través del escáner láser con el objetivo de levantar todo el espacio interior.

- Toma de datos

El levantamiento fue realizado utilizando el escáner láser Leica C10 y la cámara panorámica iSTAR 360°.



**Imagen 22: Escáner Láser Leica C10 sobre trípode. Fuente Leica Geosystem.**



Imagen 23: Cámara panorámica iSTAR 360°.

- Post-procesado

Los datos obtenidos a través de los escaneos, o sea las nubes de puntos de datos sin formato, se han procesado con el *software* Cyclone, que realiza la operación de registro.

Como resultado se ha obtenido la nube de puntos completa del patio, por lo que se pudo comprobar que el proyecto de levantamiento, y, en particular, la determinación a través de Depthmap de los posicionamientos óptimos desde los cuales levantar, ha sido eficiente.

- Elaboración de la planimetría

Importado el archivo (.RCP) en AutoCAD y, a través de los comandos de sección ha sido posible la creación de un oportuno plano de sección y de una rebanada de la nube de punto para dibujar la planta del área levantada.

## 4.3 Caso de estudio

Como ya se ha dicho, el edificio elegido es el Pabellón Mudéjar, situado en Plaza de América y obra del arquitecto sevillano Aníbal González para la Exposición Iberoamericana de 1929.

En este apartado se realiza una introducción acerca del edificio y del su autor.

### 4.3.1 Aníbal González

Principal referente del regionalismo andaluz, a comienzos del siglo XX, en Sevilla Aníbal González vistió las casas de ladrillo y azulejo, construyó capillas, monumentos y panteones y dejó su huella impresa en la esencia de la ciudad hasta nuestros días. (Pérez Escolano, 1973)

El primero de tres hermanos, desde muy pequeño sus primeros trazos en dibujos llaman la atención a la familia (Pérez Escolano, 1973). El joven Aníbal destaca no solo por sus dibujos sino también en sus estudios, de manera que su madre le anima para que estudie arquitectura, después de hacer el bachillerato por enseñanza libre. Sus padres, viendo el potencial de su primogénito, hicieron un esfuerzo para pagar sus estudios universitarios.

En 1895 Aníbal se prepara para el ingreso en arquitectura en la academia de Antonio Ollero en las disciplinas de álgebra, matemáticas, geometría y física, presentándose al año siguiente a ingreso en la Escuela de Arquitectura en Madrid, iniciando sus estudios en octubre de 1896 (Pérez Escolano, 1973).

Durante los seis años de carrera (1896-1902) se dedica en cuerpo y alma a estudiar y dibujar, ver museos y llevarse horas y horas en la biblioteca de la Escuela de Arquitectura. Su estancia en Madrid le proporcionó conocer a numerosos profesores de la Escuela, donde recibió una gran influencia de ellos. Fue muy querido y admirado tanto por sus compañeros como por sus profesores.

De vuelta a Sevilla en 1902 Aníbal comienza a trabajar como arquitecto y se da a conocer en la sociedad sevillana.

Dos años después en 1904, Aníbal se casa con Ana Gómez Millán, hija del arquitecto José Gómez Otero y hermana de la gran saga de arquitectos Gómez Millán (José, Antonio y Aurelio). Con Aurelio Gómez Millán sería con quien más trataría Aníbal González, sobre todo durante la etapa de la Exposición del 1929. Gómez Millán construyó por ejemplo el Pabellón Domecq.

Apoyado por su suegro en sus inicios, González realiza proyectos modernistas, como, por ejemplo, el Café de París en la Plaza de la Campana esquina con O'Donnell, desafortunadamente desaparecido. El Café de París, construido entre 1904 y 1905, fue un café archiconocido y frecuentado en la Sevilla del primer tercio del siglo XX; en los años 40 se convirtió en el "Bazar La Importadora" (Aníbal González: el arquitecto de aquella Sevilla, s.f.).



**Imagen 24: Café de París (Aníbal González: el arquitecto de aquella Sevilla, s.f.)**

Entre 1907-08 el Sr. Noguera le hace un encargo al joven arquitecto para realizar un edificio en la calle Sta. María de Gracia, esquina con la plaza de la Campana, Aníbal a partir de entonces proyecta un edificio de estilo neomudéjar, que será el punto de partida para una conversión al regionalismo y repudiar el modernismo.

En resumen, Aníbal se estrena con una arquitectura modernista influencia de la escuela de Madrid, pasa por un corto periodo historicista-revivalista, para caer de lleno en una arquitectura nacional, cuyas raíces las extrae en un regionalismo andaluz y más plenamente sevillano, que permanecerá en su arquitectura hasta su fallecimiento en 1929 (Aníbal González. Un museo para Sevilla, s.f.).

Su prestigio va en aumento con los años, especialmente, cuando gana el concurso en 1911 para una magna exposición la Hispanoamericana en 1921 («La Exposición Iberoamericana», 1926) (Homenaje al arquitecto insigne D. Aníbal González, 1926). Sus proyectos, memoria y documentación abruman al

jurado y al público sevillano, presentando estos con un estilo historicista de corte regionalista que es del gusto de toda Sevilla. (Pérez Escolano, 1973)

Ya en 1912 comienza las obras de lo que posteriormente sería la Plaza de América: una plaza con tres pabellones todos ellos de estilo español, el primero el Pabellón Mudéjar, el segundo el Pabellón de los Reyes Católicos de estilo gótico-flamígero y el último el Pabellón del Renacimiento hoy museo Arqueológico (Morales Martínez, 2006).

Mientras la Plaza de América se construye el francés J.C. Forestier diseña el Parque de María Luisa inaugurándose este en 1914. A la vez que se construía la Plaza de América, Aníbal en agosto de 1914 da comienzo las obras de la Plaza de España, esto es, el pabellón de España. Al principio el arquitecto pensó en hacer un estadio que sirviera no solo como lugar deportivo sino para grandes eventos, finalmente Aníbal, traslada ese proyecto de estadio a donde actualmente está el estadio del Real Betis Balompie, no realizado por él (Aníbal González. Un museo para Sevilla, s.f.).



**Imagen 25: Plaza de España. Elaboración propia.**

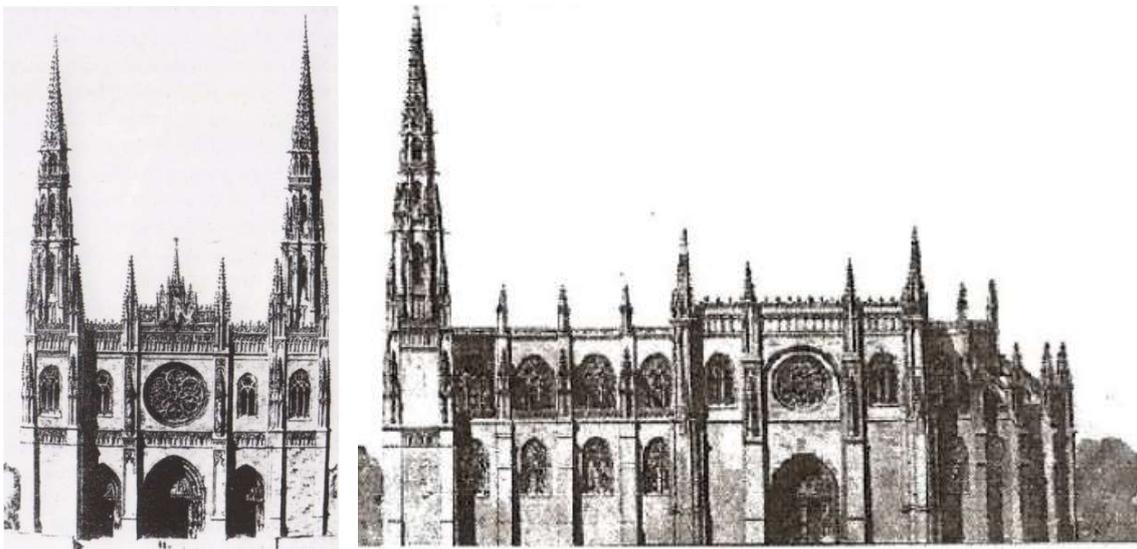
En 1915 en el VI Congreso Nacional de Arquitectura, celebrado en San Sebastián, Aníbal González junto con Leonardo Rucabado presentan una ponencia sobre la defensa de la Arquitectura Nacional que tuvo el beneplácito de los congresistas, esto motivó, que el arquitecto sevillano organizara en 1917 el VII Congreso Nacional de Arquitectura que supuso el espaldarazo total a la tesis del regionalismo.

No se debe olvidar que Aníbal González era un personaje mediático y como tal sufrió en enero de 1910 un atentado que afortunadamente resultó ileso. Se culpó a un grupo anarquista dentro del sindicato de albañiles que en aquellos días hacía huelga en la construcción (Aníbal González. Un museo para Sevilla, s.f.).

Con motivo del cambio político, la Dictadura del General Primo de Rivera, toma como asunto de Estado la terminación de las obras de la Exposición Iberoamericana de Sevilla, de manera que el recién nombrado comisario de la Exposición Cruz Conde toma la decisión de eliminar la mayoría de los miembros de la Comisaría. González, en desacuerdo con Cruz-Conde en diversos aspectos, dimite como arquitecto-director de la Exposición después de 15 años de arduo trabajo (Pérez Escolano, 1973).

El arquitecto, que tenía tanto prestigio, lo requerían para hacer nuevos proyectos, entre otros, se debe destacar el gran proyecto para los Jesuitas de hacer una gran basílica para la Inmaculada Milagrosa, una gran plaza con un obelisco en el centro y distintas edificaciones a su alrededor para residencia de alumnos y religiosos y otra parte, dedicada a la enseñanza con un gran aula.

Aníbal González siempre preocupado por sus obreros y ya que, en 1927, estaban casi terminadas las obras de la Plaza de España, se trajo a sus operarios para trabajar en el complejo religioso de la Milagrosa. Desafortunadamente durante las obras el arquitecto Aníbal González enfermó gravemente, falleciendo el 31 de mayo del 1929. De la basílica se había construido la cimentación y el basamento. Su diseño era de estilo neogótico con dos grandes torres en su fachada principal, siempre respetando la altura de la Giralda y un gran rosetón. Este complejo religioso no se continuó dado la complejidad de las obras, según los arquitectos a los que le ofrecieron su continuidad (Aníbal González. Un museo para Sevilla, s.f.).



**Imagen 26: Fachadas del proyecto de Aníbal González para la basílica de la Milagrosa. (Aníbal González: el arquitecto de aquella Sevilla, s.f.)**

El fallecimiento del arquitecto fue verdaderamente llorado por el pueblo de Sevilla y buena muestra fueron los miles de personas que acompañaron al féretro. Aníbal murió en la ruina, ya que aún no le había sido pagada la mayor parte de la obra de la Exposición de 1929.

#### 4.3.2 Pabellón Mudéjar

El edificio, en el que ahora se encuentra el Museo de Artes y Costumbres Populares de Sevilla, fue construido en el Parque de María Luisa como parte de conjunto de la Plaza América para la exposición Iberoamericana del 1929. Fue denominado Pabellón de Industrias, Manufacturas y Artes Decorativas, más tarde Pabellón de Arte Antiguo e Industrias Artísticas y, posteriormente, Pabellón Mudéjar (Museo de Artes y Costumbres Populares de Sevilla, s.f.).

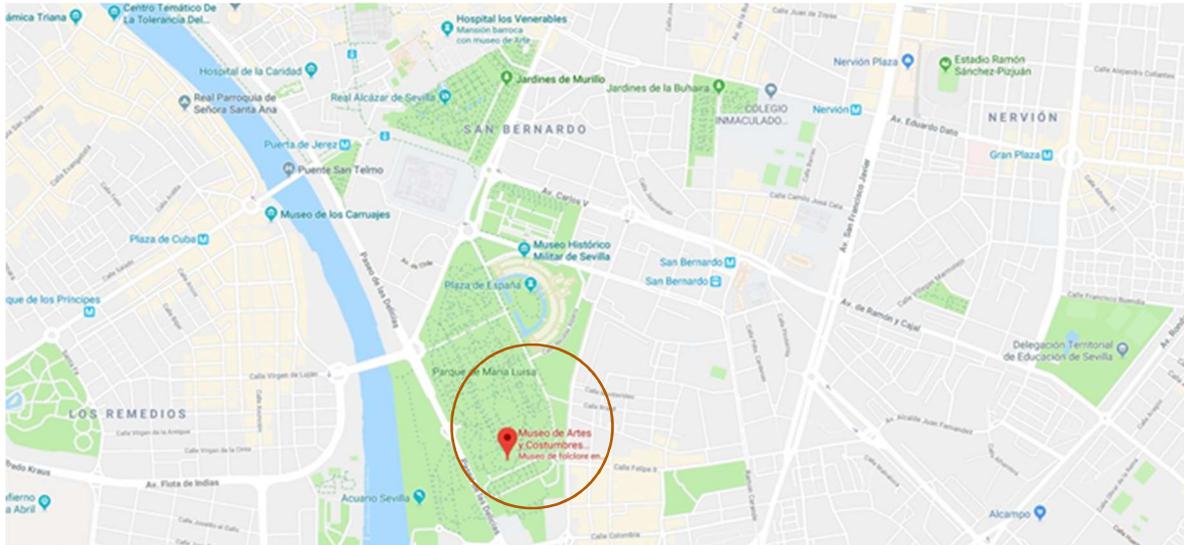


Imagen 27: Ubicación.

Su construcción se inicia en 1912 y fue el primero en terminar de construirse como pabellón permanente en el año 1914, el otro es el actual Museo Arqueológico que antes era el Pabellón de las Bellas Artes.

Alberto Villar Movellán, en una su obra, describe así el edificio: *“El edificio tiene un eje longitudinal muy pronunciado y se compone de un cuerpo central y dos alas laterales. Estas se articulan con una planta bastante movida, y la galería de arcos que exteriormente la rodea constituye a eliminar cualquier sensación de pesadez. El cuerpo central, exuberante en colorido, se resuelve en la fachada con una interpretación personal del autor sobre modelos tradicionales – Reales Alcázares de Sevilla, Palacio del Marqués de la Algaba, Alhambra de Granada - y en el patio con alusiones al mudéjar claustral de San Isidoro del Campo o de la Rábida”*. (Movellán, 1979)

El estilo arquitectónico del pabellón, conocido como neomudéjar, evoca las tradiciones arquitectónicas locales mediante la utilización de elementos comunes de la arquitectura mudéjar, como el uso de ladrillo para la construcción y la decoración, y la incorporación de azulejos y arcos entrelazados polilobulados y de herradura como principales elementos del programa decorativo.

El término mudéjar se refiere a los musulmanes que vivieron bajo el dominio cristiano después de las conquistas cristianas, y se ha utilizado para describir una amplia variedad de arquitectura islámica producida en la Península Ibérica y el Nuevo Mundo.

El Pabellón ocupa el lado izquierdo de la Plaza de América, accediendo desde la Avenida de la Palmera. La planta baja se encuentra elevada sobre la cota de la plaza en 2,5 m, salvando el acceso, mediante una gran escalinata y dos rampas laterales que rodean a esta, ocupando toda la fachada.

El acceso al edificio se realiza después de atravesar una imponente fachada entre dos torres miradores, con cubiertas de cerámica a cuatro aguas, y está formado por una puerta principal y dos laterales más pequeñas; las tres están formados por dos arcos, apoyados sobre columnas de mármol blanco con capitel, que se superponen uno a otro: el exterior de herradura lobulado en cerámica totalmente decorativo, y el interior, otro arco de herradura, estructural ejecutado con ladrillo aplantillado que descarga sobre un dintel de ladrillo a dos colores. Este arco en la puerta lateral apoya en el muro de fachada, que es un ladrillo visto alternando con bandas de cerámica. (Exposicion iberoamericana de sevilla 1929, s.f.)



**Imagen 28: Puerta principal (Exposicion iberoamericana de sevilla 1929, s.f.).**

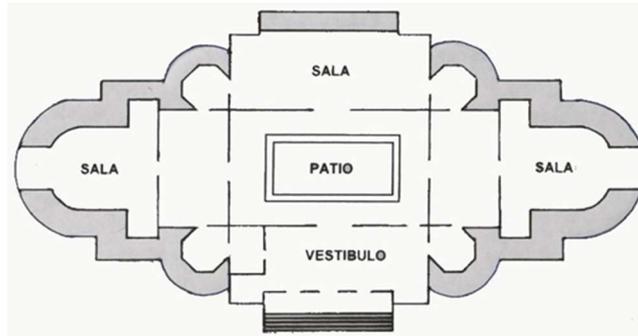
Una vez traspasadas las puertas, se penetra en el gran vestíbulo de forma rectangular que se divide en tres zonas bien delimitadas por una estructura de tres series de arcos, a la vez de una serie más reducida, hasta alcanzar el techo: los tres arcos de medio punto de ladrillo visto están sustentados por columnas de mármol, sobre estos se apoyan otros arcos de herradura, formados por entrecruzamiento de estos.

El patio de dos plantas de altura, labrado todo en ladrillo tallado, sobre un antepecho de un metro, se alzan pilastras ochavadas, también de ladrillo, donde se apoyan los arcos de medio punto peraltados, y enmarcados dentro de un alfiz que se decoran con azulejos pintados de estilo renacentista. La planta alta se organiza con un apilastrado con tratamiento plateresco entre las que se sitúan una bíforas con columnilla central. El patio presenta dos puertas enfrentadas, resueltas mediante arco de medio punto con abocinamiento, ejecutado por baquetones a modo de las portadas de las iglesias mudéjares (Exposicion iberoamericana de sevilla 1929, s.f.).



**Imagen 29: Patio.**

En el deambulatorio que circunda el patio se encuentran las entradas a las cinco salas de exposición: una situada al fondo, simétrica al vestíbulo y abierta a uno de los paseos principales del Parque de María Luisa, donde existía otro acceso en el proyecto primitivo; en los lados menores del patio se sitúan dos salas a cada lado y el paso a estas se realiza a través de una portada con arco de medio punto, peraltado y lobulado, realizado en escayola y sustentado por columna. Las alas laterales se rodean con una galería abierta de arcos de medio punto de ladrillo apoyados sobre esbeltas columnas de mármol blanco.



**Imagen 30: Planta esquematizada del pabellón (Exposición iberoamericana de Sevilla 1929, s.f.).**

El pabellón básicamente disponía de una sola planta ya que las superiores eran más simbólicas que útiles. Por la escalera del vestíbulo se accedía a la entreplanta, que ocupaba únicamente el deambulatorio del patio y las torres de la fachada. Sobre esta se situaba la planta de honor compuesta por un salón.

Entonces, se superponen dos plantas de edificios diferentes: una es un rectángulo muy alargado rematados por dos semicírculos y está inspirada a los grandes edificios de las exposiciones universales celebradas con anterioridad; la otra es una planta centrada que se desarrolla alrededor de un patio y representa la introducción del factor exótico, con una clara referencia a las construcciones palaciegas del medio oriente islámico.

El cromatismo tan atrayente de este edificio hizo que rápidamente fuera el pabellón con más protagonismo estético de la plaza, la cual refleja el mismo esquema compositivo que el edificio, así como la mezcla, hecha magistralmente, de elementos islámicos con otros platerescos consiguió la atracción de los espectadores por el pintoresquito efecto (Exposición iberoamericana de Sevilla 1929, s.f.).

Actualmente el edificio ha cambiado con respecto a su concepción inicial, primero porque, poco después de clausura de la Muestra, el 28 noviembre de 1930, se produjo un importante hundimiento del edificio que afectó a la zona de la fachada posterior. Este no fue el único ya que se tiene noticias que en los años 50 se produjo el hundimiento del techo del ala oeste, así como desaparición de la cubierta de la galería perimetral de esa ala (Macía, s.f.).

El edificio tuvo muy distintos usos desde su construcción hasta que el 23 de marzo de 1972, el Ministerio de Educación y Ciencia publica el Decreto de Creación del Museo de Artes y Costumbres Populares de Sevilla, que se constituye como una sección del Museo de Bellas Artes. En dicho decreto se establece que el museo se instalará en el Pabellón Mudéjar. Por mano del arquitecto municipal Antonio Delgado Roig se hizo la adaptación a las nuevas necesidades del edificio como museo: se eliminaron los altísimos techos (más de doce metros de altura), logrando una entreplanta, correspondiente actualmente a la planta primera. Además, José Galnares Sagastizábal diseñó la actual

escalera de mármol, que sustituía a la escalera primitiva de González, y fue instalado un ascensor en el hueco que quedaba.

El museo abrió sus puertas al público el 4 de marzo de 1973.

El 26 de marzo de 1980 el Ayuntamiento adopta en Pleno el acuerdo de cesión de uso de la totalidad del edificio, con el compromiso del Ministerio de acondicionarlo. La cesión tiene carácter indefinido mientras el edificio se use como sede del Museo de Artes y Costumbres Populares. En febrero del año siguiente, el Ministerio encarga a Fernando Villanueva Sandino la redacción del Proyecto de Obras de Conservación y Restauración del Museo. La reapertura del mismo en 1984 coincide con la transferencia de la gestión de los museos de titularidad estatal a la Comunidad Autónoma de Andalucía y con la firma del convenio de gestión, el 18 de octubre de 1984. (Museo de Artes y Costumbres Populares de Sevilla, s.f.)

### 4.3.3 Museo de Artes y Costumbres Populares



**Imagen 31: Fachada principal del Pabellón Mudéjar en Plaza de América.**

Las instalaciones abiertas al público incluyen, además de las salas de exposición permanente, las salas de proyección y audiovisuales donde el visitante puede contemplar documentos sobre la vida tradicional andaluza, elaborados por las Áreas de Investigación y de Difusión del Museo, y una amplia zona dedicada a exposiciones temporales que permiten mostrar los fondos de reserva del propio Museo o de otras instituciones afines.

Una visita corriente empieza por la planta primera (Museo de Artes y Costumbres Populares - propuestas de recorrido, s.f.), con una exposición existente que responde a una temática de artes decorativas o suntuarias que a la propiamente etnológica por lo que está a la espera de ser reformada. El nuevo proyecto no solo se justifica por el envejecimiento natural de la instalación que data de 1972, sino porque la concepción museológica ha ido quedando desfasada con el paso de los años y hoy se requieren nuevas instalaciones que aporten un mayor confort a las personas y una mayor seguridad a las piezas.

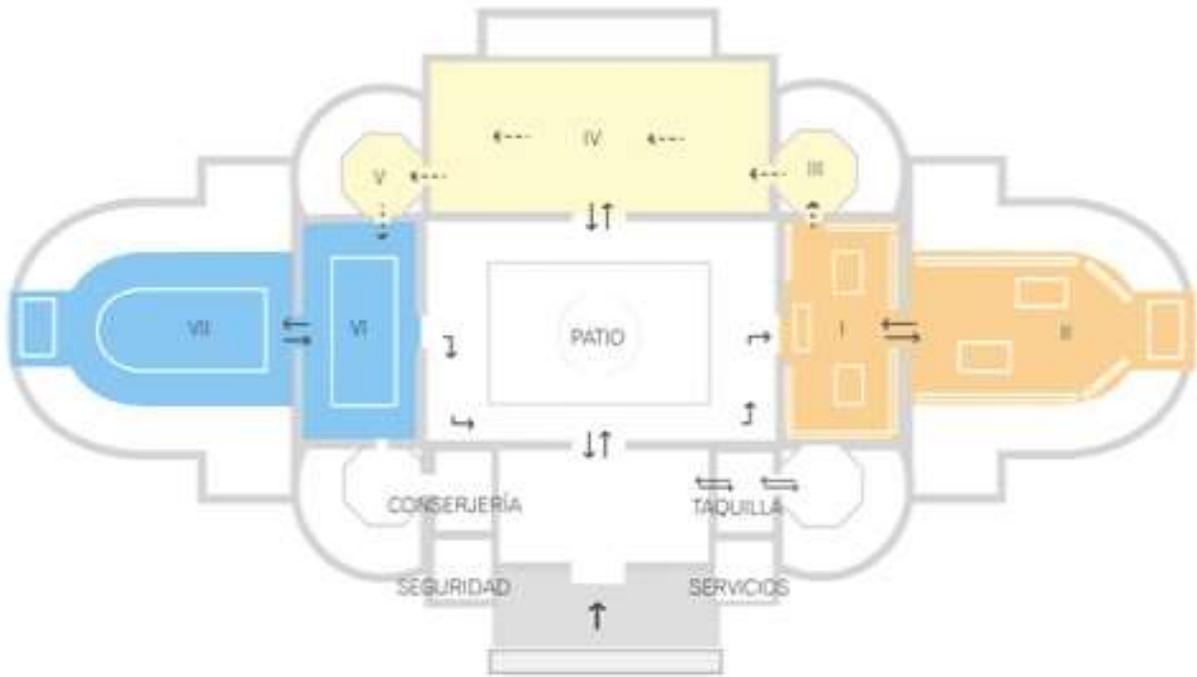


**Imagen 32: Tinajas modeladas expuestas en la galería del patio de la planta principal (Museo de Artes y Costumbres Populares de Sevilla, s.f.).**

La planta principal (Museo de Artes y Costumbres Populares - propuestas de recorrido, s.f.) del museo se aproxima a los 2.000 m<sup>2</sup> de superficie. La sala central está dedicada a exposiciones temporales, mientras que el área de exposición permanente, dedicada íntegramente a la Colección Díaz Velázquez, se distribuye en cuatro salas (I, II, VI y VII) con una superficie de 660 m<sup>2</sup>.

Las salas I y II se encuentran actualmente cerradas por reformas y contienen una selección de las piezas más representativas de la colección de bordados y encajes, una de las más completas de Europa en este género.

Las salas VI y VII contienen la reconstrucción de la vivienda de la familia que donó dicha colección. El espacio interior de una vivienda suele dar una idea bastante exacta, no sólo del nivel social de sus moradores, sino también de sus gustos estéticos, su manera de concebir y distribuir el espacio, sus actividades, sus hábitos y su forma de vida en general. La concepción de la casa y su menaje corresponde a los estereotipos de la alta burguesía andaluza de finales del siglo XIX. Los estilos del mobiliario evidencian cierta preferencia por los modelos ingleses, pero también están representadas las líneas españolas del Renacimiento y la influencia francesa en el mueble español del estilo Imperio.



**Imagen 33: Plano de circulación de la planta principal (Museo de Artes y Costumbres Populares - propuestas de recorrido, s.f.).**

El recorrido de la planta semisótano (Museo de Artes y Costumbres Populares - propuestas de recorrido, s.f.) ofrece al visitante tres grandes bloques temáticos.

El primero, comprendido en las salas I a III, es un análisis de las funciones y la tipología del mobiliario y los utensilios domésticos. (Sala I – La casa: espacios domésticos. Sala II - Funciones el ajuar. Sala III - Tipos de contenedores domésticos).

El segundo, dedicado a los oficios artesanales y a las actividades de transformación de ciertas materias primas, se agrupa en las salas IV, X, XI y XII. (Sala IV - Oficios Artesanales. Salas X y XI – Técnicas de transformación. Sala XII: Pesas y medidas).

El tercero se dedica a la documentación de las producciones cerámicas: azulejería, cerámica histórica, cerámica popular actual y loza industrial desde la sala V a la VII. (Salas V y VI - Azulejería, centros históricos de producción cerámica y cerámica popular. Sala VII - La Cartuja de Sevilla).

La sala VIII desarrolla el tema monográfico de las armas destinadas a la defensa personal. (Sala VIII - Técnicas de transformación: metalistería).

La sala IX muestra las técnicas de transformación de la metalistería. La última sala del recorrido de esta planta se dedica a la documentación de los sistemas de medidas tradicionales de peso y de capacidad para áridos y líquidos. (Sala IX – Armería: armas blancas y de fuego).



**Imagen 34: Plano de circulación de la planta semisótano (Museo de Artes y Costumbres Populares de Sevilla, s.f.; Museo de Artes y Costumbres Populares - propuestas de recorrido, s.f.).**

Las instalaciones abiertas al público incluyen, además de las salas de exposición permanente y de exposiciones temporales, el salón de actos y la biblioteca, en la planta segunda, especializada en Antropología y Museología.

## 4.4 *Software* de trabajo: UCL Depthmap, un programa para el análisis de visibilidad

UCL Depthmap es un programa que permite realizar un tratamiento informático de la metodología VGA (*Visibility Graph Analysis*). Supone, por tanto, una interesante herramienta para analizar sistemas arquitectónicos o urbanos desde el punto de vista de la visibilidad o la accesibilidad entre las diferentes localizaciones del sistema analizado. El programa permite al usuario importar el fichero (en formato DXF) de la planta (bidimensional) a analizar y, a partir del mismo, obtener el grafo de visibilidad de dicho sistema, así como algunas de las medidas que pueden resultar de interés para describir espacialmente el sistema.

Aquí se quiere explicar sus principales herramientas e indicadores.

### 4.4.1 Importación de la planta

Para empezar, es necesario crear en Depthmap un archivo *graph*, para ello, pulsar [File→New](#) en la barra de menús. Ahora, ya se puede importar la planta que se quiere analizar mediante el cuadro de navegación que se abre al pulsar [Map→Import](#).

Para un típico análisis VGA, los planos que se importan deben ser dibujados en 2D. El dibujo vectorial fue una elección temprana para asegurarse que se pudiera recuperar información visual precisa.

Actualmente los tipos de archivos de importación admitidos son: formato DXF de AutoCAD, formato NTF (este es el formato para datos Ordnance Survey 'LandLine', que están fácilmente disponibles para las universidades del Reino Unido) y otro formato llamado CAT.

El cargador DXF se ha vuelto gradualmente más complejo, pero aún es mejor importar planos con solo líneas, polilíneas y polígonos. Los círculos y las curvas ralentizan significativamente el análisis y solo se aproximan dentro del mapa de Depthmap. Además, no es posible la creación o modificación de plantas en el propio programa; es decir, si se debe introducir algún cambio en la planta, ha de generarse el correspondiente fichero DXF y volver a importarlo. Es posible importar varios gráficos (plantas) en el mismo fichero.

Hay dos tipos de capas en Depthmap. Hay capas VGA y hay capas de líneas. Las capas de línea son las capas que originalmente estaban contenidas dentro del DXF o NTF (files CAT no tienen capas). Depthmap respeta las capas que se hayan creado al confeccionar el fichero DXF y ofrece la opción de activar o desactivar estas capas sobre el gráfico. Esto es útil cuando se realizan diferentes tipos de análisis VGA (por ejemplo, es posible que se quiere abrir puertas dentro de un plan para permitir la visión y, por lo tanto, la visibilidad gráfica, para pasar a través de ellas). Para hacer esto, ir al menú [View](#) y seleccionar [Line layer chooser](#), se abre una ventana con una lista de capas; para 'encender' o 'apagar' una capa pulsar el icono de ojo siguiente al nombre de la capa (Turner A. , Depthmap 4 — A Researcher's Handbook, 2004).

Después de haber importado el file DXF, varias opciones en la barra de herramientas estarán disponibles; en particular:

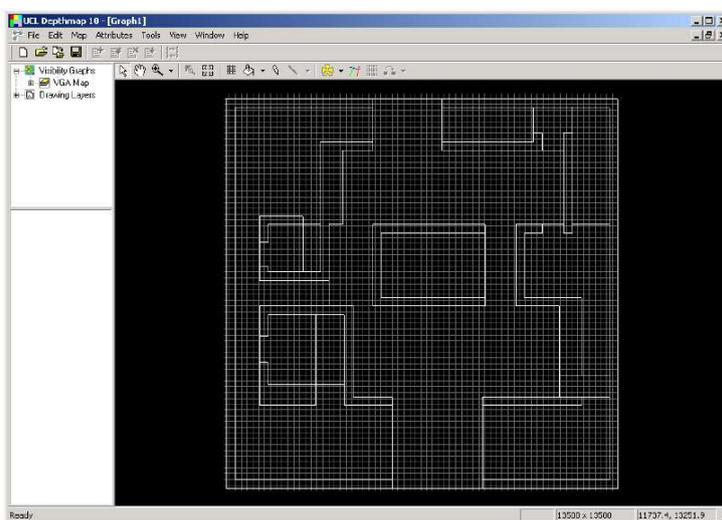
- Movimiento del gráfico.
- Ampliación del gráfico

- Reducción del gráfico.

Es posible incluir información adicional sobre el archivo *graph* de Depthmap, por ejemplo, la ubicación geográfica del sitio en el plan. Para hacerlo seleccionar **Properties** en el menú **File**: se podrá establecer el título, la ubicación y una breve descripción.

#### 4.4.2 Preparación malla del grafo de visibilidad

Después la importación de un plano 2D a analizar, el paso siguiente es la preparación de una malla de localizaciones de puntos para el análisis. Para hacer esto: **Tool**→**Visibility**→**Set Grid**: esto permite establecer la precisión de la malla en función de las dimensiones del gráfico; hecho esto, en la ventana de visualización entonces se puede observar una malla sobre la planta.



**Imagen 35: Mallado del sistema (Abajo & Delgado).**

Es importante aclarar que los vértices del grafo de visibilidad son los centros de los cuadrados que conforman la malla: aunque se muestra un conjunto de cuadrados para facilitar la visualización de los puntos, la visibilidad siempre se evalúa desde el centro del cuadrado de la malla.

Una vez construida la malla, el siguiente paso consiste en el relleno de esta. Para ello, pulsar el botón **Fill** y a continuación pulsar sobre la zona de la malla que se quiere rellenar (dicha zona debe estar geoméricamente “cerrada”). Es posible también el relleno de cuadrados individuales a través de la herramienta **Lapiz**.

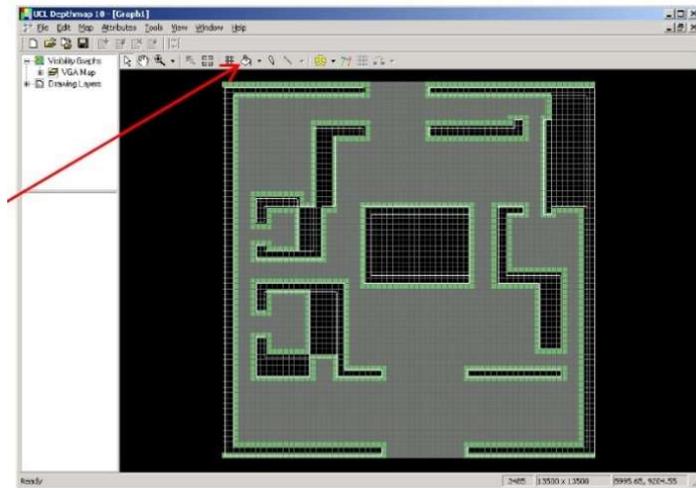


Imagen 36: Rellenado de malla (Abajo & Delgado).

#### 4.4.3 Construcción grafo de visibilidad

Una vez rellenadas las localizaciones de la malla en función del objetivo perseguido, se puede obtener el correspondiente grafo de visibilidad pulsando [Tool→Visibility→Make Visibility Graph](#). Depthmap analizará la intervisibilidad entre el centro de cada cuadrado de la malla y el centro del resto de cuadrados, creando (internamente) el grafo de visibilidad asociado, y procesará el gráfico por un tiempo que depende de cuantos puntos está hecho, y de cuanto estos puntos están interconectados, antes de mostrar algunos resultados en la pantalla. En vez de mostrar el (muy complicado) grafo, Depthmap muestra la conectividad, o tamaño del entorno, de cada punto: sobre la planta se colorea cada localización de acuerdo con el número de localizaciones que pueden verse desde la misma. Se obtiene así un mapa de colores sobre la planta cuyo rango fluctúa desde el azul (localizaciones con poca visibilidad), pasando por el verde, amarillo, naranja hasta rojo (localizaciones con mucha visibilidad). Pasando el cursor sobre una específica localización, aparece el número de localizaciones que está capaz de ver. En este instante se puede también generar la distancia de cualquier localización del grafo al resto de localizaciones. Para analizar el grafo: [Tool→Visibility→Run visibility graph analysis](#).

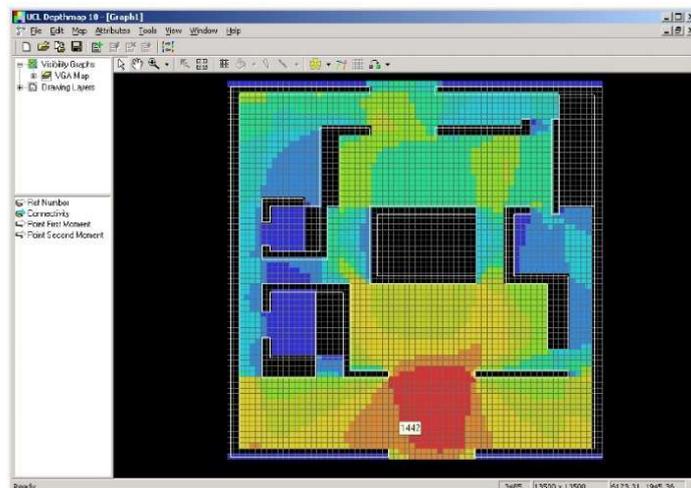


Imagen 37: Mapa de colores relativo al tamaño del entorno o conectividad (Abajo & Delgado).

Al generar el grafo de visibilidad, el programa también pone a disposición una lista básica de atributos del grafo obtenido: conectividad (visualizada), *isovist maximum radial*, *isovist moment of inertia*.

La palabra isovista es un nombre inapropiado, ya que una isovista es técnicamente el polígono, o más bien el área, visible desde cada nodo. De hecho, el *isovist maximum radial* es la distancia de cada nodo a la posición visible más lejana; el *isovist moment of inertia* se calcula utilizando los puntos en lugar del polígono isovista y se refiere a cuanto fácilmente gira un objeto: cuanto menor es el momento de inercia, más fácilmente girará un objeto.

En general una cosa que se quiere ver es la isovista relativa a una localización; Depthmap no calcula exactamente un isovista, o sea el polígono que contiene toda el área visible de una particular localización, pero permite de obtener una aproximación de la isovista relativa a dicha localización. En efecto, con el cursor en modo flecha, se selecciona una localización (o un grupo de localizaciones). Pulsando **Tools→Visibility→Step Depth→Visibility Step** aparece la planta dividida en “polígonos” de diferentes colores. Cada uno de esos polígonos está constituido por el conjunto de localizaciones que están a la misma distancia de la localización (o grupo de localizaciones) seleccionada al principio.

Este mapa de colores muestra la cantidad de pasos necesarios para llegar a cualquier otra posición a partir de la actual: aparece en celeste el conjunto de localizaciones que están a distancia 1 de la localización inicial seleccionada (localizaciones directamente visibles y “alcanzables” con un solo paso), en verde el conjunto de localizaciones a distancia 2 de la inicial (son necesarios dos pasos para pasar a una de estas posiciones) , en amarillo el conjunto de localizaciones a distancia 3,... (obviamente, una aproximación de la isovista del punto inicial seleccionado es el polígono celeste). Esto aporta una idea de, por ejemplo, qué localizaciones son más privadas (a más distancia visual) respecto del punto inicial seleccionado.

Se puede hablar también de profundidad visual (*Visual Depth*) de cada localización, observando que la profundidad visual es una medida del camino más corto a través del gráfico (en terminología de grafos, la distancia entre dos vértices de un grafo es el número de aristas del camino más corto, con menos aristas, que une ambos vértices).

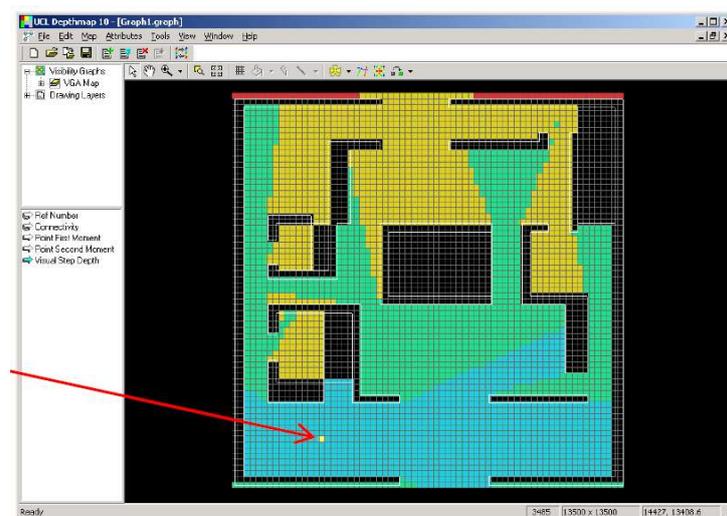


Imagen 38: El sistema dividido en regiones según la distancia a la localización inicial (Abajo & Delgado).

Obsérvese que se crea un nuevo elemento (denominado Visual Step Depth) en la lista de atributos. Es importante señalar que para conservar la profundidad una localización se debe renombrar dicho atributo pulsando con el botón derecho del ratón sobre él.

Una vez construido el grafo de visibilidad, es posible llevar a cabo el análisis de lo mismo a través [Tools→Visibility→Run Visibility Graph Analysis](#), en este momento se abre un cuadro de dialogo con diferentes opciones adicionales disponibles:

- [Calculate Isovist Properties](#) (eligiendo esta opción aparecen en la lista de atributos correspondientes a propiedades de isovistas: *Isovist Area*, *Isovist Compactness*, *Isovist Perimeter*, etc.);
- [Calculate Visibility Relationship](#) (para realizar un análisis de visibilidad del grafo);
- [Calculate Metric Relationship](#) (para realizar un análisis métrico del grafo).

#### 4.4.4 Análisis de visibilidad (VGA: visibility graph analysis)

Dentro del análisis de visibilidad es posible realizar un análisis "global" del grafo y un análisis "local" del grafo. Las **medidas globales** se basan en las rutas más cortas desde cada nodo, a través del grafo de visibilidad, a todos los otros nodos. Las **medidas locales** se basan en las relaciones entre cada nodo y los nodos directamente conectados a él.

La razón por la cual los dos están divididos es que, en función del tipo de grafo, el análisis para medidas globales o locales puede tardar mucho. Por ejemplo, si el grafo es compacto con una gran cantidad de espacio abierto (por ejemplo, un edificio de planta abierta), las medidas locales serán lentas, mientras que las medidas globales serán más rápidas. Por el contrario, si el grafo es de una red de calles, donde cada nodo tiene relativamente pocas conexiones, las medidas globales serán lentas, mientras que las medidas locales serán más rápidas (Turner A. , Depthmap 4 — A Researcher's Handbook, junio 2004).

Después de calcular las medidas, a cada medida se le asigna un nombre que comienza por 'Visual'. Esto es para distinguir las medidas VGA de medidas métricas y axiales.

##### **Medidas globales**

Las medidas globales del grafo incluyen 'profundidad media', 'cuenta de vértices', 'integración' y 'entropía'.

- **Profundidad media** (*Visual Depth*)  
Se denomina profundidad de un vértice a la suma de las distancias desde ese vértice a todos los restantes del grafo.  
Como la profundidad de un vértice es el resultado de sumar las distancias desde éste a todos los demás, puede ser interesante averiguar la media de esas cantidades (profundidad divisa por el número de vértices en el grafo, meno el vértice considerado): la profundidad media representa el número de giros en media requeridos para que un observador situado en el vértice seleccionado puede visualizar el resto de las localizaciones del grafo.
- **Cuenta de vértices** (*Node Count*)  
Expresa el conteo de vértices en el grafo.

- **Integración** (*Integration*)

Es esencialmente una versión normalizada de la profundidad media (la 'normalización' es un procedimiento para hacer que los diferentes sistemas sean comparables entre sí, generalmente forzando un valor en el rango de 0-1).

- **Entropía** (*Entropy*)

Una medida de entropía es una medida de la distribución de las posiciones en términos de profundidad visual desde un vértice; la entropía es baja para distribuciones desiguales, ya sea que estén cerca o lejos del nodo actual.

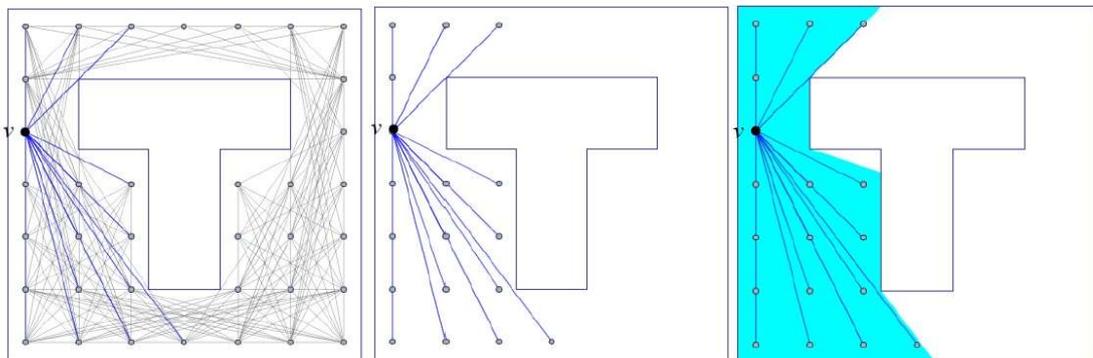
La entropía relativizada (*relativised entropy*) tiene en cuenta la distribución esperada del vértice, es decir, la cantidad de vértices que se pueden encontrar avanzando en el grafo (el número de vértices que se pueden encontrar aumenta hasta el valor de profundidad media, después será menor).

### **Medidas locales**

Las medidas locales calculadas por Depthmap son 'tamaño del entorno', 'coeficiente de agrupamiento', 'coeficiente de control' y 'coeficiente de controlabilidad'.

- **Tamaño del entorno o conectividad** (*Connectivity*)

El entorno de un vértice es el conjunto de vértices que están conectados a él mediante una arista. En términos del grafo de visibilidad, el entorno de una localización es el conjunto de localizaciones visibles desde dicha localización. El tamaño del entorno de un vértice es, entonces, el número de elementos del entorno. Si el conjunto de localizaciones generadoras (vértices del grafo de visibilidad) es suficientemente amplio y cubre todo el espacio de la planta de manera uniforme, entonces el entorno de un vértice puede ser identificado como la isovista generada por dicho vértice. Por tanto, el tamaño del entorno de un vértice está íntimamente relacionado con el área de la isovista generada por dicho vértice.



**Imagen 39: Los vértices unidos a v mediante una arista conforman su entorno y la isovista de la localización v (Abajo & Delgado).**

Como sugiere Benedikt, en el estudio de la percepción del espacio a través de la visibilidad es necesario ir más allá de la interpretación de isovistas aisladas, por lo que parece natural obtener esta medida para todas las localizaciones generadas. Así, es interesante confeccionar un mapa de colores sobre la planta estudiada, utilizando una escala que fluctúa desde el azul (localizaciones con poca visibilidad), pasando por el verde, amarillo, naranja hasta el rojo (localizaciones con máxima visibilidad). Este mapa puede dar información sobre la experiencia visual de un individuo que se mueve por dicho espacio.

- **Coeficiente de agrupamiento** (*Visual Clustering Coefficient*)

El coeficiente de agrupamiento de un vértice se define como el número de aristas del grafo que existen entre los distintos vértices del entorno de un nodo seleccionado (es decir, el número de líneas de visión entre las diferentes localizaciones que conforman la isovista de la localización generadora) dividido por el número máximo de aristas posibles entre los distintos vértices del mismo entorno.

Por ejemplo, se consideran dos diferentes grafos. El coeficiente de agrupamiento del grafo a la izquierda es nulo, puesto que no existen aristas entre los vértices adyacentes a él. Por lo contrario, el coeficiente de agrupamiento del grafo a la derecha es  $2/3$  (hay dos aristas entre los vértices adyacentes a  $v$ , mientras el número máximo de aristas posibles entre esos tres vértices es 3) (Abajo & Delgado).



**Imagen 40: Grafos con diferente coeficiente de agrupamiento (Abajo & Delgado).**

Obsérvese que el numerador (número de aristas existentes) de la fracción que define a dicho coeficiente siempre es menor o igual que el denominador (número máximo de aristas posibles), por lo que el coeficiente de agrupamiento de cualquier vértice es un número real entre 0 y 1.

En términos de percepción del espacio, puede decirse que el coeficiente de agrupamiento de un punto es, pues, una medida de la cantidad de espacio intervisible en la isovista generada desde dicho punto (Turner, Doxa, O'Sullivan, & Penn, 2001). Indica qué proporción del campo visual de un observador situado en dicho punto se conservará o se perderá a medida que se desplace desde el mismo. Si el coeficiente de agrupamiento es un valor cercano a 1 en una determinada localización, entonces, el desplazamiento del observador desde dicha localización en cualquier dirección no causará una gran pérdida o ganancia de información visual (por ejemplo, movimiento de un individuo en una estancia de planta rectangular). Sin embargo, un valor cercano a 0 del coeficiente de agrupamiento en un determinado punto significa que el desplazamiento desde tal punto puede suponer una considerable variación de información visual (por ejemplo, movimiento de un individuo en una intersección).

- **Coeficiente de control** (*Visual Control*)

Para obtener el coeficiente de control de un vértice  $v$ , en primer lugar, se selecciona un vértice  $u$  del su entorno; a continuación, se obtiene el tamaño del entorno del vértice  $u$  y se calcula su inverso; una vez realizada esta operación para cada uno de los vértices del entorno de  $v$ , el valor del coeficiente de control se consigue sumando todos los inversos obtenidos.

Como su nombre indica, este coeficiente intenta identificar áreas visualmente dominantes. Para que una localización tenga un coeficiente de control alto, debe “ver” una gran cantidad de localizaciones, pero, a su vez, éstas últimas deben ver pocas localizaciones.

El ejemplo perfecto de una localización “controladora” es la localización en el centro del panóptico de Bentham: este punto puede ver cada celda, pero estos espacios pueden ver poco. En contraste, las celdas son localizaciones “poco controladoras”, pues ven pocas localizaciones.

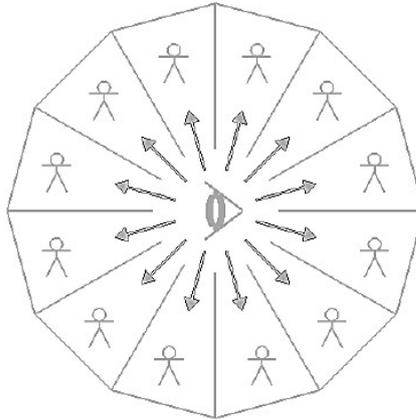


Imagen 41: Esquema del panóptico de Bentham (Abajo & Delgado).

- **Coefficiente de controlabilidad** (*Visual Controllability*)

El coeficiente de controlabilidad representa otra forma de identificar zonas de dominancia visual. Un vértice ejerce mucho control visual sobre sus localizaciones vecinas si estas últimas son vistas desde pocos lugares o, dicho de otro modo, si “hay pocos” vértices a distancia 2 (se recuerda que por distancia entre dos vértices se entiende la longitud del menor camino en el grafo que une ambos vértices). De esta forma, se puede definir el coeficiente de controlabilidad de un vértice  $v$  como la proporción entre el número de vértices adyacentes a él (es decir, a distancia 1) frente al número de vértices a distancia menor o igual que 2.

### Propiedades geométricas de isovistas

El análisis visual de un sistema puede completarse con el estudio de medidas que describen ciertas propiedades geométricas de las isovistas y su relación con la localización que la genera. Entre las más básicas se encuentran (Abajo & Delgado):

- **Área** (*Isovist Area*)

El área de una isovista está directamente relacionada con cuánto se puede ver desde la localización que genera dicha isovista.

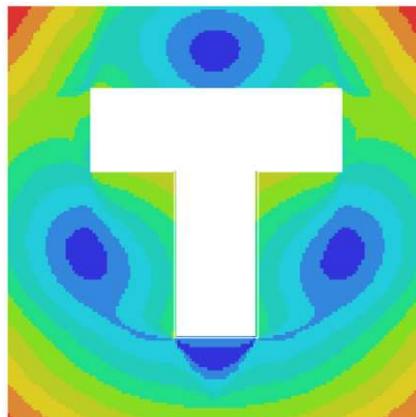
- **Perímetro** (*Isovist Perimeter*)

El perímetro de una isovista es la longitud total del contorno de ésta.

Al analizar el contorno de una isovista como elemento informativo para la percepción visual, es necesario distinguir entre contorno físico (formado por paredes, puertas, etc.) y contorno oclusivo (o contorno no físico, resultante a partir de algún elemento constructivo que impide la visión de todo el espacio).

En un segundo nivel están las propiedades cuya definición es más compleja o bien utiliza las propiedades anteriores:

- **Oclusividad** (*Isovist Occlusivity*)  
 Se puede considerar la oclusividad de una localización como una medida que denota imprevisibilidad, ausencia de información visual de un hipotético observador situado en dicha localización, dado que un elemento constructivo generador de contorno oclusivo oculta parte del espacio en el que se encuentra. En una localización, un valor elevado de oclusividad, conyugada con otras medidas, podría sugerir una percepción incompleta del espacio arquitectónico por parte del observador; la existencia de incertidumbre, de lugares escondidos en el espacio que lo “empujase” a descubrirlo para satisfacer su curiosidad.
- **Circularidad** (*Isovist Compactness*)  
 La circularidad (o compacidad) de una isovista informa sobre cuánto se parece la isovista a un círculo. Para ello, se compara el área de la isovista con su perímetro al cuadrado y se normaliza multiplicando por una constante.  
 De esta forma, un círculo tiene circularidad 1, mientras que un rectángulo de base muy grande y altura muy pequeña tendría circularidad próxima a 0.
- **Coefficiente de desplazamiento** (*Isovist Drift Magnitude*)  
 El coeficiente de desplazamiento de una localización es la distancia física entre dicha localización y el centro de gravedad de su isovista (calculado considerando tal isovista como una lámina poligonal de grosor despreciable pero uniforme).  
 En un sistema, una localización con coeficiente de desplazamiento cercano a 0 (y que, por tanto, está muy próxima al centro de su isovista) se sitúa en el centro del espacio que la rodea, por lo que este tipo de puntos pueden considerarse como “centros relativos del sistema”.



**Imagen 42: Coeficiente de desplazamiento para una configuración en “T” (Abajo & Delgado).**

Desde el punto de vista de la percepción espacial, algunos estudios indican que tales centros relativos se identifican con las localizaciones hacia las que un observador hipotético, desplazándose por el sistema en una exploración inicial, dirigiría sus pasos (atravesando las curvas de nivel del mapa anterior) a fin de obtener una óptima exploración visual del espacio que le rodea y, una vez situado en alguno de estos centros, decidir su nuevo objetivo.

## 4.5 Análisis de visibilidad

Antes de proceder con la toma de datos en el Pabellón Mudéjar, se ha realizado la planificación del trabajo de levantamiento a través de Depthmap.

Esto fue posible por la existencia de un plano de la planta principal, proporcionado por los responsables del mismo museo. Como ya se ha dicho antes, el área seleccionada, al cual se ha limitado el levantamiento, es el área del vestíbulo de ingreso, del ambulatorio y del patio. Las columnas presentes pueden considerarse como obstáculos para la toma de datos a través del escáner láser.

Entonces, los pasos seguidos han sido los siguientes:

- Importación en Depthmap del archivo DXF.  
Dibujar en AutoCAD el plano del área objeto del levantamiento para poder exportar el archivo DXF, recordando que esto es uno de los tipos de archivos de importación admitidos en Depthmap.
- Creación de la malla necesaria para la localización de puntos para el análisis.  
En la creación de la malla se tiene la opción de establecer el espaciado de la malla. En este caso se ha dejado el valor de *default* porque, como en la mayoría de los casos, es la mejor opción ya que este valor es apropiado a las dimensiones del dibujo (Turner A. , Depthmap 4 — A Researcher's Handbook, 2004).

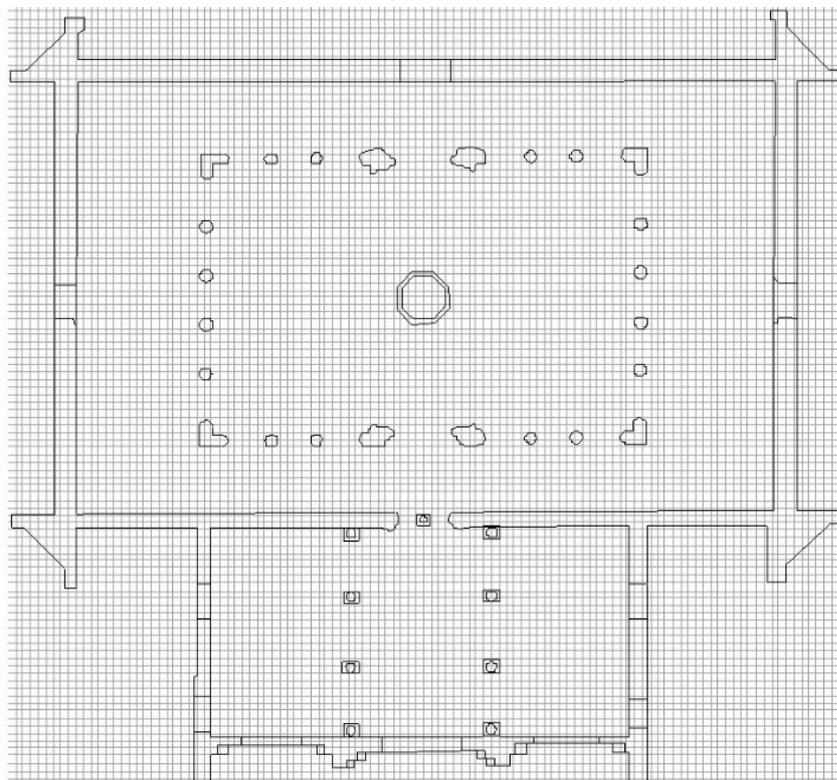


Imagen 43: Creación de la malla.

- Relleno de la malla.  
Depthmap permite llenar el espacio 'contextual' para el análisis, o sea, simplemente se llenan las áreas que después se analizarán.

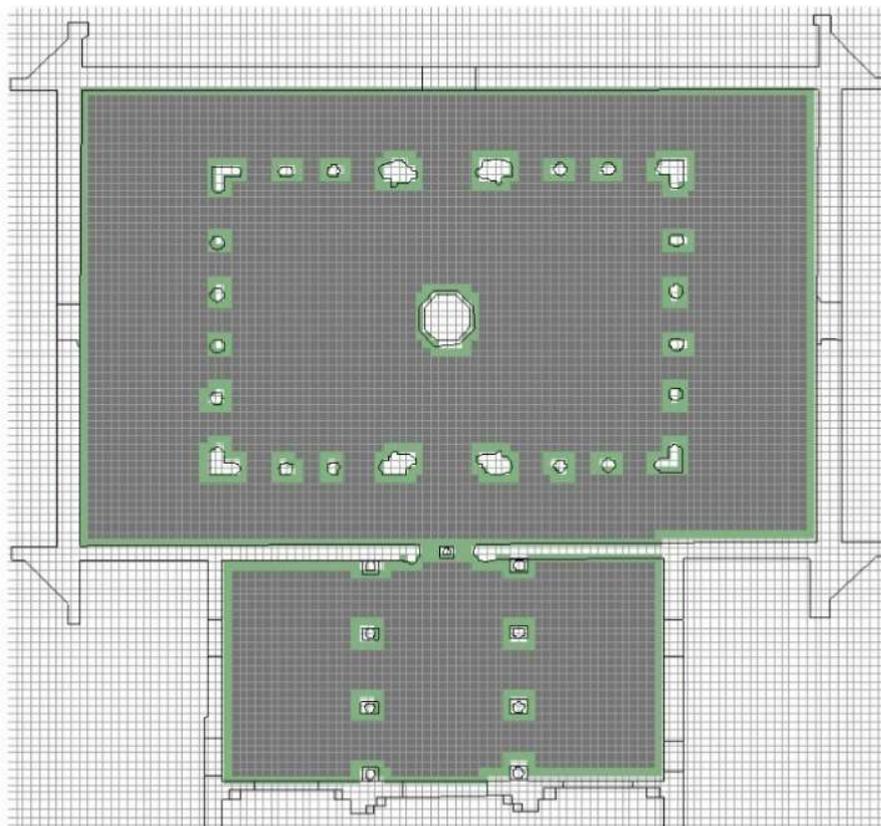
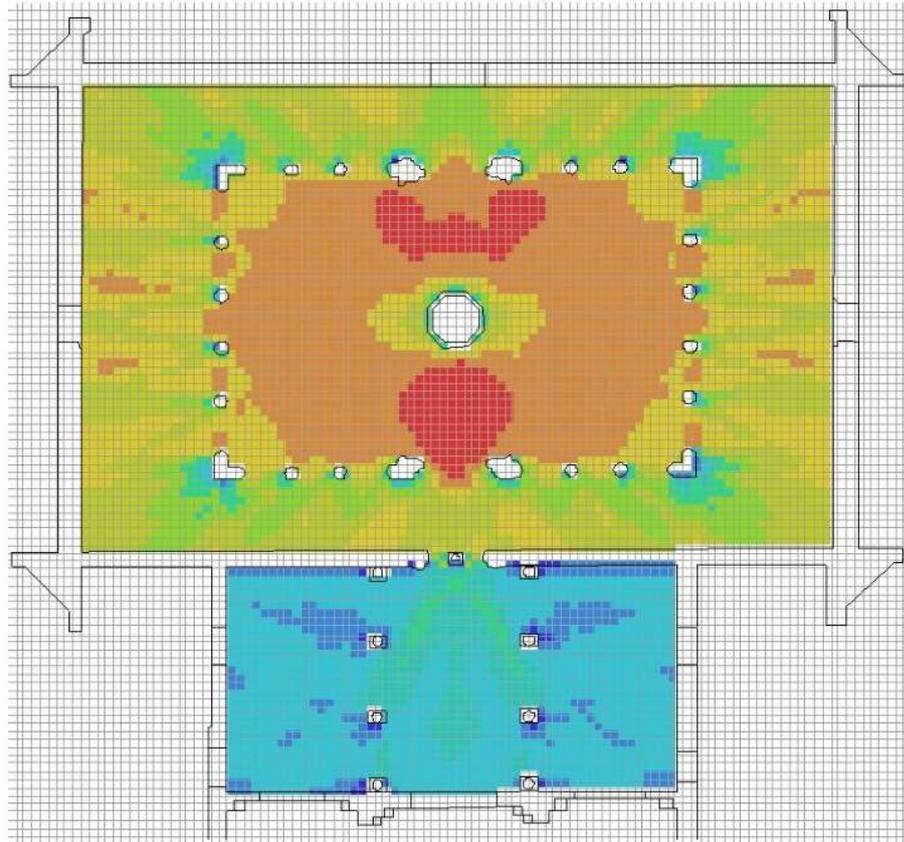


Imagen 44: Relleno de la malla.

- Construcción y análisis del grafo de visibilidad.  
La construcción del grafo de visibilidad la hace internamente el *software*, no apareciendo dicho grafo visualmente en la pantalla debido a la complejidad del mismo. Mientras en la pantalla se muestra el mapa de conectividad visual del área a analizar.  
Las localizaciones con pocas visibilidades están en azul, mientras en rojo están coloreadas las zonas con mucha visibilidad. En la siguiente imagen es posible ver que las zonas con mayor visibilidad son las que están arriba y abajo de la fuente octagonal. De hecho, desde estas zonas, hay posiciones que alcanzan a ver alrededor de 3800 localizaciones de las 6700 existentes (información que se encuentra en la parte inferior a la derecha de la pantalla), es decir, su campo visual cubre prácticamente poco más del 50 % de la planta.  
Además, se debe tener en cuenta que en el plano importado en Depthmap se mantuvo la fuente porque, incluso si es de una altura tal que no obstruye la toma de datos de los alzados del patio, es de todas formas un elemento a considerar para un completo levantamiento a nivel de suelo.



**Imagen 45: Tamaño del entorno o conectividad.**

- Determinación de los puntos desde los cuales escanear.

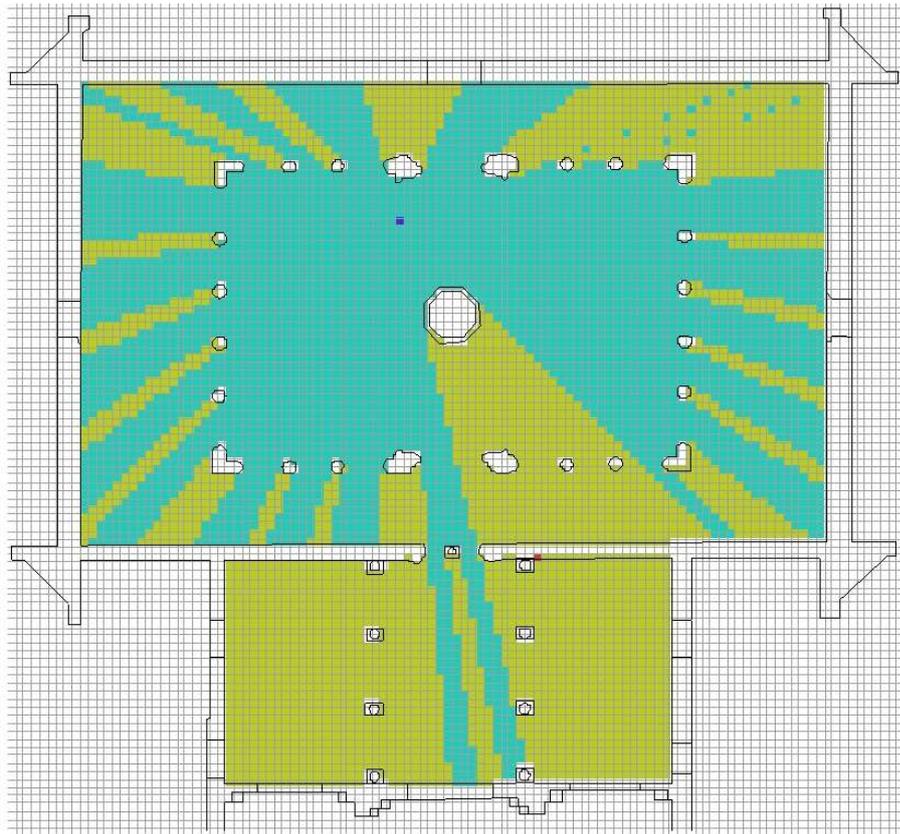
Se va a crear un itinerario para cubrir toda la vigilancia y, de manera lógica, la mejor opción es comenzar por uno de los puntos que presenta una mejor visibilidad. Elegido el primer posicionamiento en la zona roja debajo de la fuente, se procede con la creación de la isovista relativa a esta localización a través de un análisis de profundidad visual (*Visibility Step*). O sea, se calcula el área visualizada (*step depth*) a partir de la posición actual.

En la pantalla, la planta aparece repartida en zonas de diferentes colores. Cada color refleja el número de giros de visión que hay que realizar, a partir de la posición actual, para ver el siguiente color.

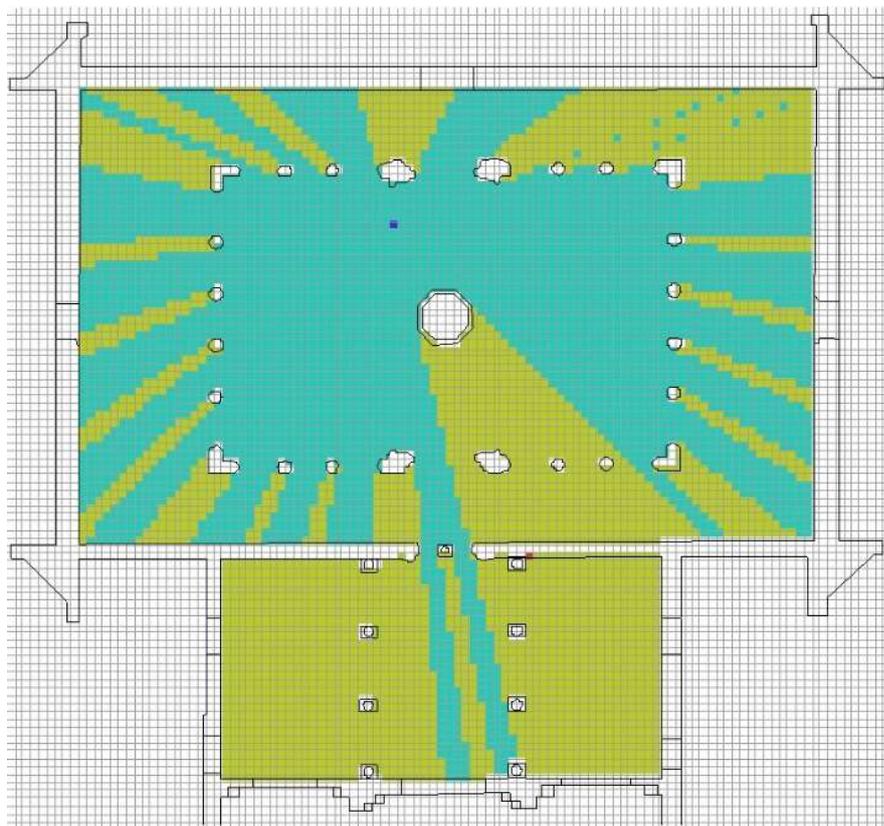
Desde la localización actual aparecen en azul las localizaciones que están a una profundidad visual 1. En verde están coloreadas todas las posiciones que están a una profundidad visual 2: son los puntos no directamente visibles desde la posición actual y que necesitan de 1 giro de vista (*step*) para que se puedan ver. El resultado es una isovista acumulativa que crece desde la posición inicial.

También se puede decir que *step depth* es el número de giros (más uno) necesario para pasar desde la posición actual a otra posición en un mismo plano (Turner A. , *Depthmap 4 — A Researcher's Handbook*, 2004).

De acuerdo con lo que se ha dicho ahora, la segunda localización desde donde escanear se elige entre los puntos en azul y teniendo en cuenta los que no estaban visibles a partir de la primera localización (en verde). También en este caso, para conseguir el objetivo de minimizar el número de estacionamientos, es mejor elegir esta segunda localización entre las que, en el mapa de visibilidad, presentan un color más cálido.



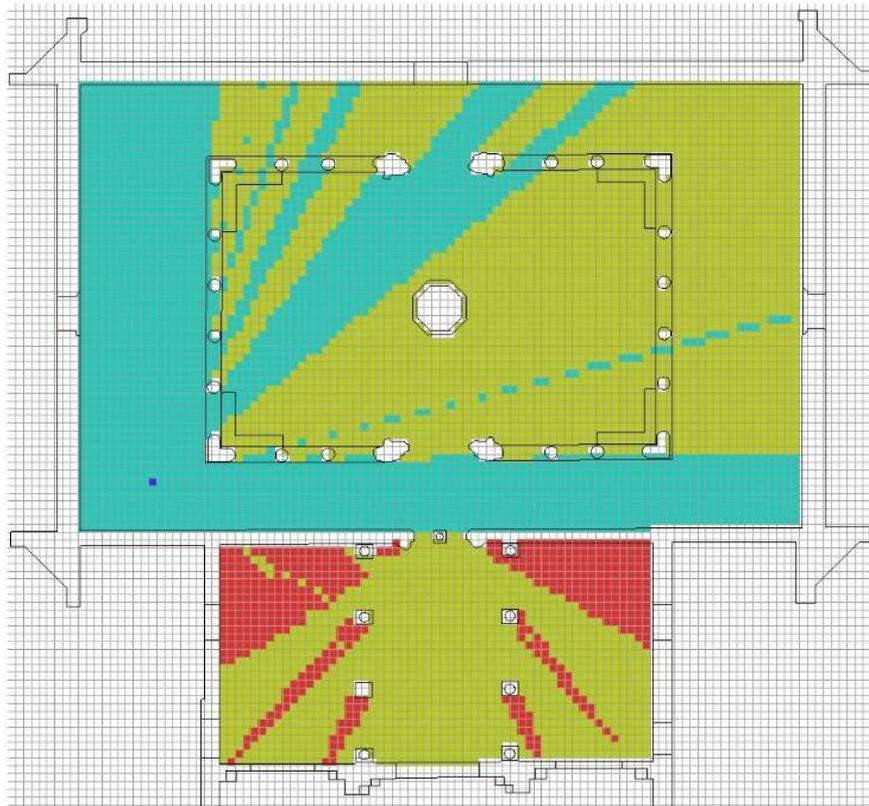
**Imagen 46: Visual Step Depth 1, o sea la isovista de la posición 1.**



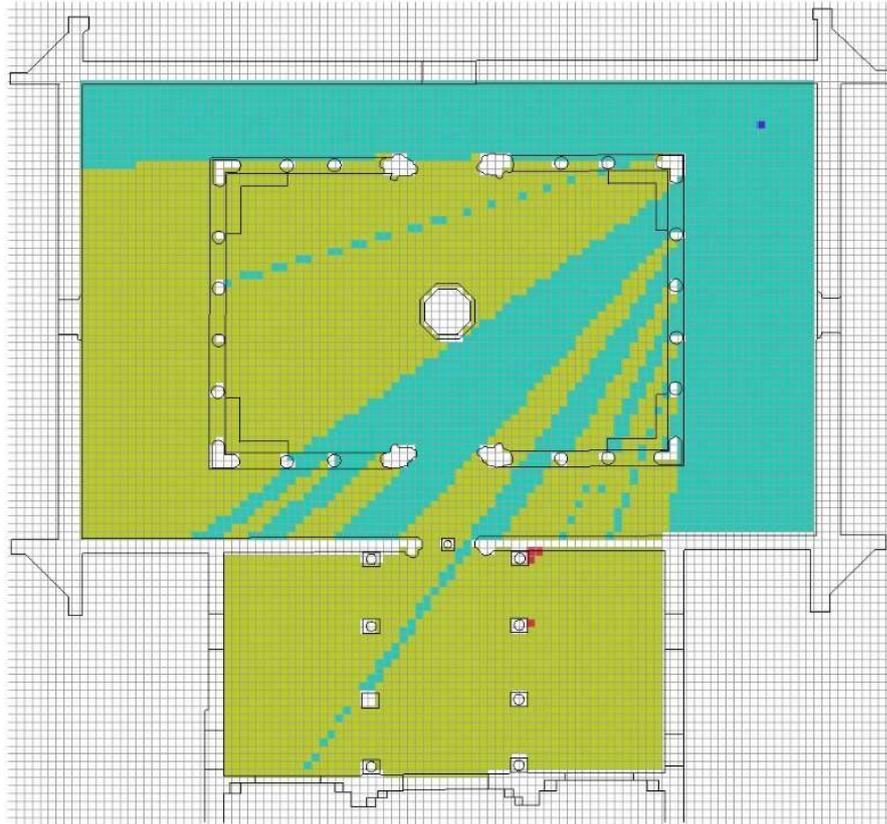
**Imagen 47: Visual Step Depth 2, o sea la isovista desde la posición 2.**

- Determinación del itinerario de levantamiento.

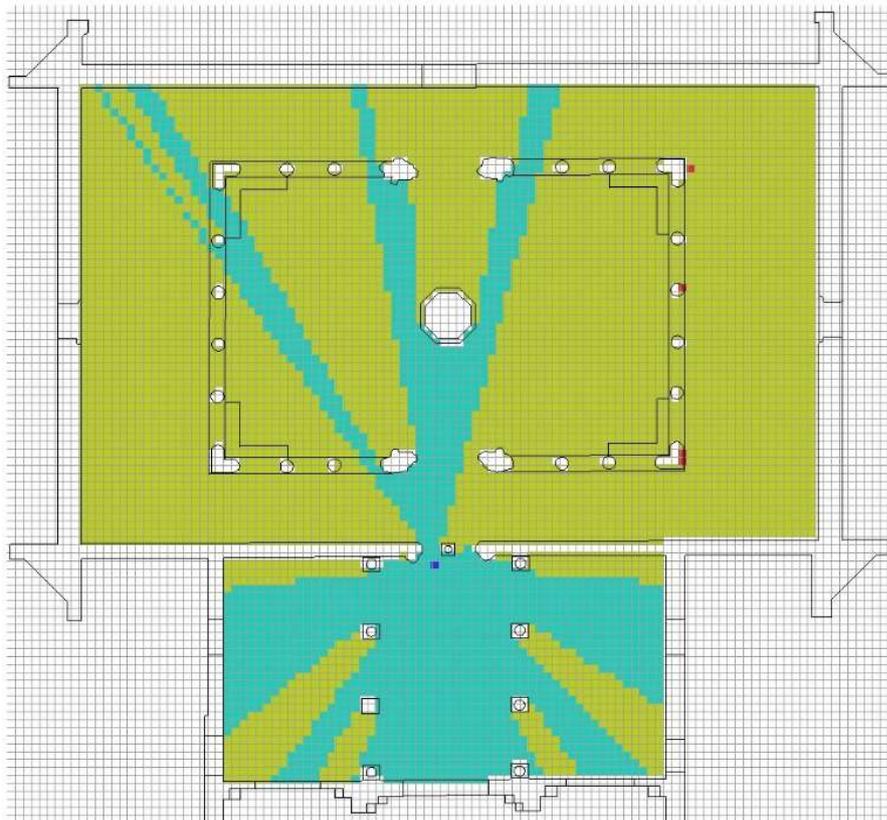
Se determinan todos los otros posicionamientos teniendo en cuenta algunos objetivos principales como el recubrimiento de toda la planta a levantar y la minimización del número de estacionamientos. También es fundamental garantizar un oportuno solape entre los escaneos. Asegurar una buena superposición de los escaneos es necesario para la operación de registro; por esto motivo que tuvo una importancia particular la posición 5 (Imagen 53), fundamental para conectar los escaneados realizados en el patio y aquellos del vestíbulo.



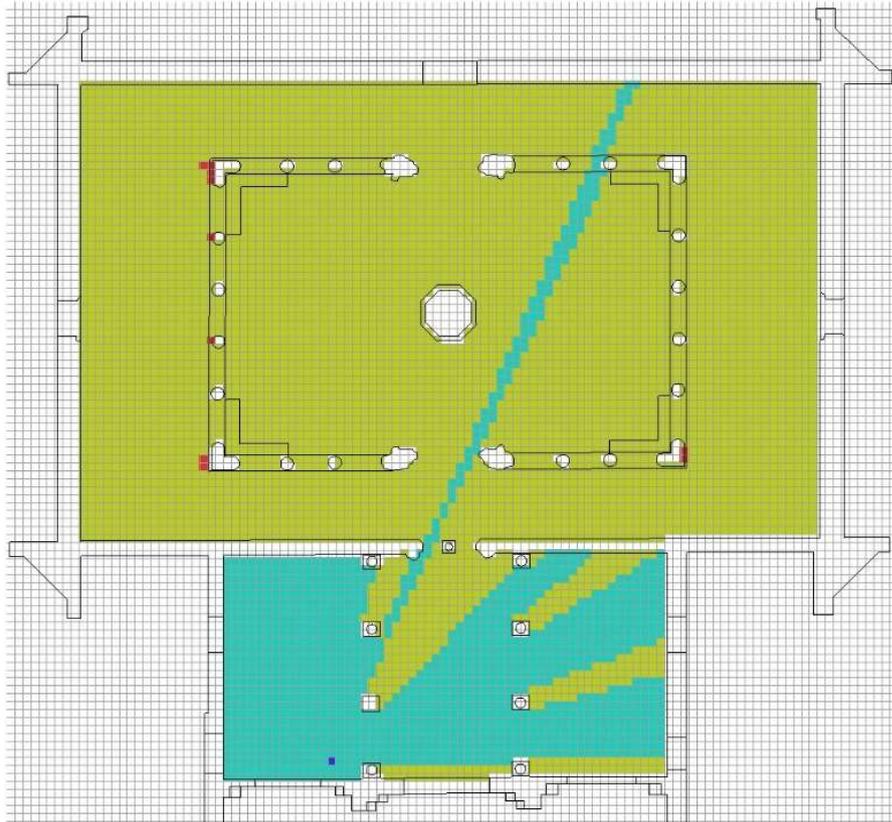
**Imagen 48: Visual Step Depth 3, o sea la isovista desde la posición 3.**



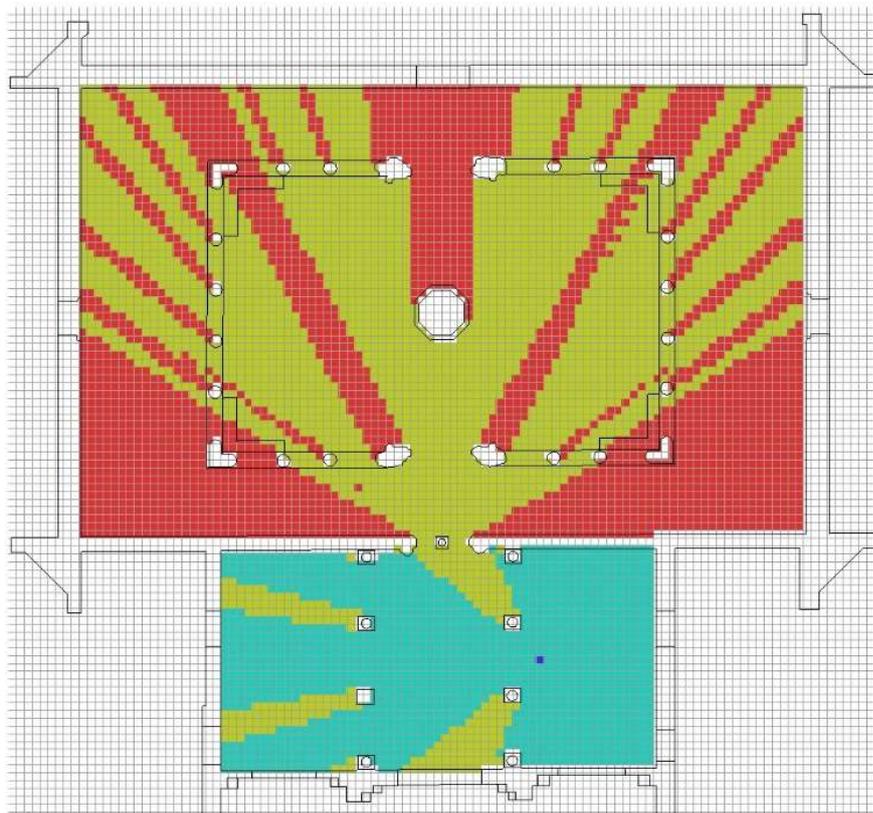
**Imagen 49: Visual Step Depth 4, o sea la isovista desde la posición 4.**



**Imagen 50: Visual Step Depth 5, o sea la isovista desde la posición 5.**



**Imagen 51: Visual Step Depth 6, o sea la isovista desde la posición 6.**

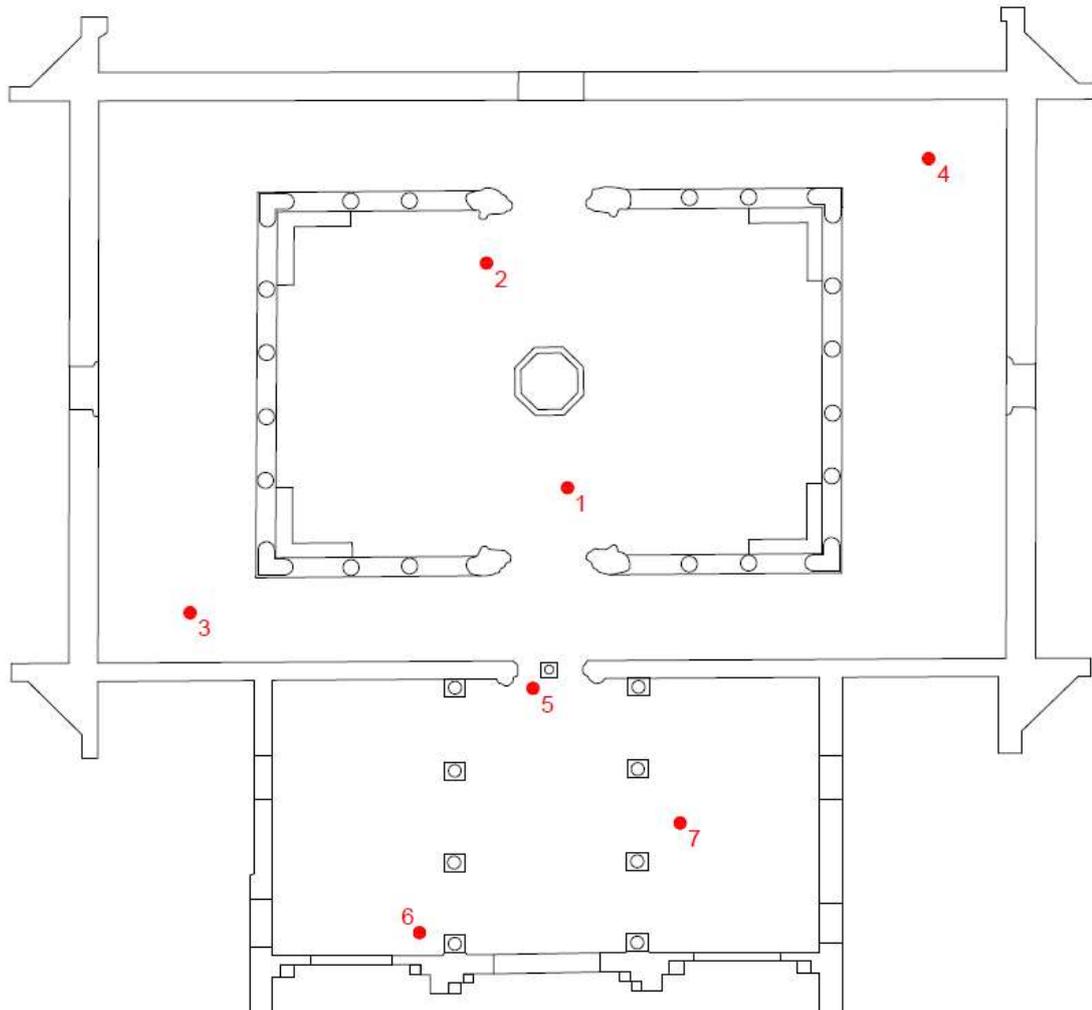


**Imagen 52: Visual Step Depth 7, o sea la isovista desde la posición 7.**

## 4.6 Materialización del levantamiento

Para la adquisición de los datos se han utilizado los siguientes instrumentos:

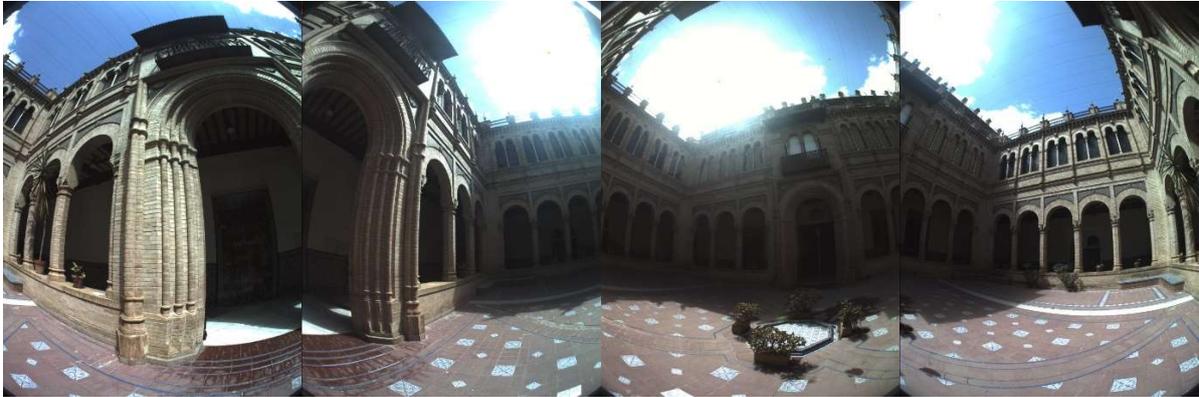
- Escáner Láser Leica C10, con tecnología basada en tiempo de vuelo.
- Cámara panorámica iSTAR 360° de Nctech.
- Trípode.
- Ordenador y plano con los posicionamientos obtenidos a través del análisis en Depthmap.



**Imagen 53: Planta con los posicionamientos obtenidos en Depthmap.**

El campo de visión tanto del escáner como de la cámara panorámica es de 360x270°, coincidiendo ambos. Por lo que, desde la misma posición en la que se ha realizado un escaneo, se ha tomado una fotografía panorámica. La cámara utilizada está compuesta por cuatro objetivos gran angulares y con esta se obtienen imágenes de alta resolución HDR.

Se precisa que solo para los dos primeros estacionamientos se ha utilizado la cámara panorámica iSTAR 360°; para los siguientes escaneos la información sobre el color se ha tomado a través de la cámara digital integrada en el mismo escáner láser, con la que se obtienen fotografías de calidad mucho más baja con respecto a la cámara panorámica.



**Imagen 54: Los cuatros fotos de la cámara panorámica desde el posicionamiento 2.**

La toma de datos se ha realizado desde puntos próximos a los obtenidos a través de Depthmap y siguiendo el itinerario antes descrito.

Se han realizado un total de siete escaneos, a una resolución de 1 centímetro a una distancia de 10 metros.

Inicialmente, las nubes de puntos se obtienen de datos sin formato escaneados. Después de recopilar los datos sin formato, estos deben convertirse en archivos de nube de puntos legibles.

En este caso, los datos obtenidos en los siete escaneos han sido registrados a través del *software* Cyclone de Leica. El registro de las nubes de puntos se ha realizado por superposición.

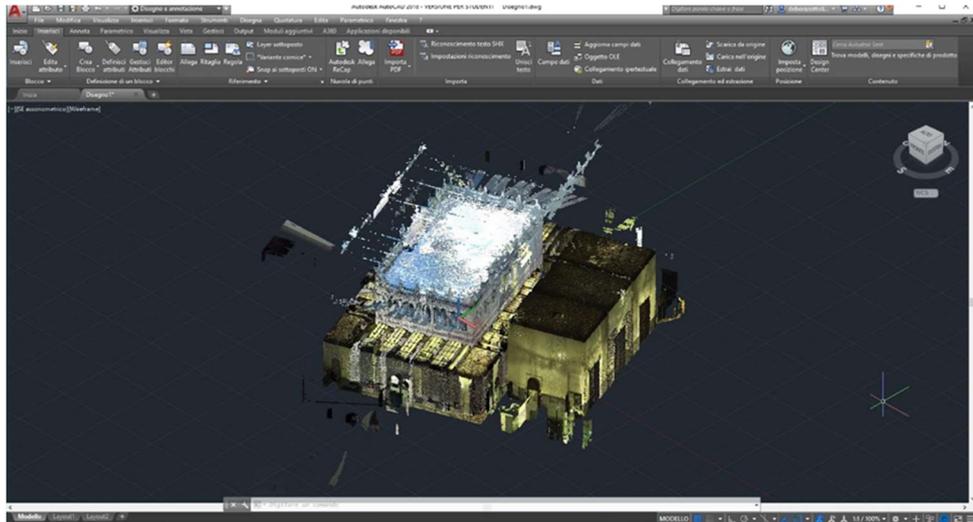
También Autodesk ReCap convierte datos de exploración sin formato en archivos de exploración (archivos RCS) y archivos de proyecto (archivos RCP) que hacen referencia a varios archivos RCS. Ambos formatos se pueden enlazar a un dibujo de AutoCAD.

## 4.7 Elaboración de la planimetría

AutoCAD, así como otros programas CAD, ofrece una completa compatibilidad con las nubes de puntos, que se gestionan como referencia externa. La nube de puntos importada en AutoCAD es visualizada como un objeto único y es posible moverla, rotarla, escalarla y seccionarla.

Muchas veces no es conveniente aplicar ninguna transformación porque se pueden perder información útil, como medidas y coordenadas de georreferenciación.

Para extraer correctamente la geometría adecuada de un archivo de nube de puntos importado en AutoCAD, se puede recortar la nube de punto en diversas secciones. Esto permite trabajar de forma detallada con un área pequeña del dibujo de nube de puntos y extraerlo en geometría 2D.



**Imagen 55: Nube de puntos completa importada en AutoCAD.**

Seleccionando el objeto, se habilita un nuevo panel con las herramientas que se pueden utilizar para trabajar con la nube de puntos.

Utilizando el comando de sección es posible elegir un plano de sección que, oportunamente posicionado, permite de dibujar una sección de la nube de puntos.

En este caso, con el objetivo de obtener una planta del área levantada, se ha utilizado un plano de sección horizontal, paralelo al suelo.

Para obtener la planta se debe poner este plano de sección a una altura oportuna desde el suelo, en este caso aproximadamente a 1,50 m. Después la creación del plano de sección, se hace una pequeña rebanada a la nube de puntos para redibujar encima un plano de la planta y obtener, por fin, la planimetría del área levantada.



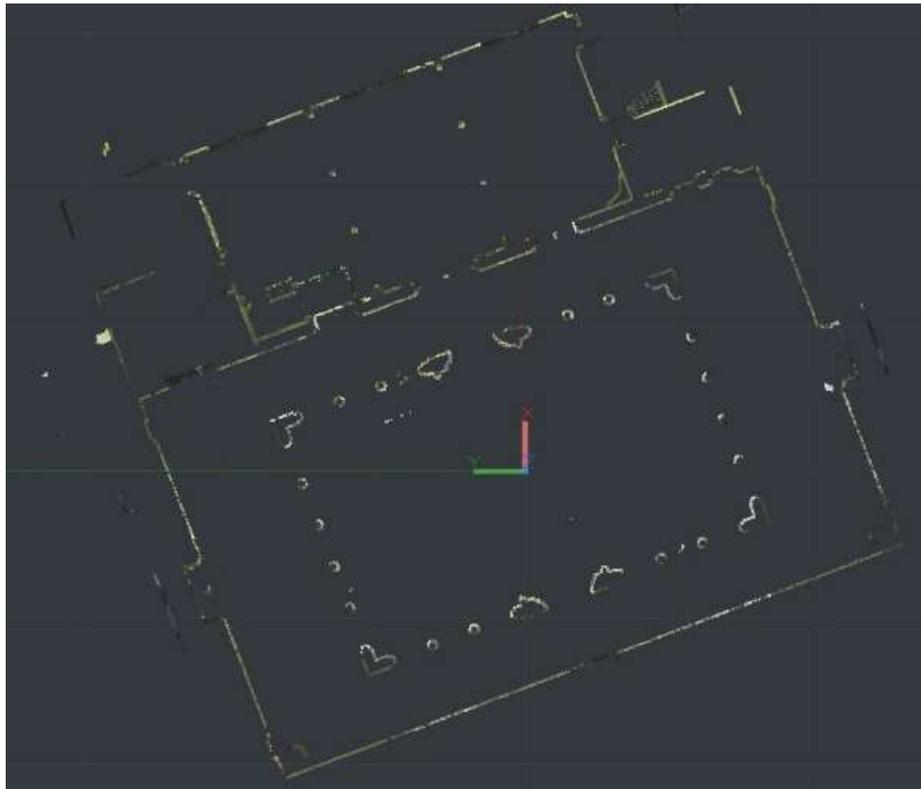
**Imagen 56: Vista en perspectiva de la sección.**



**Imagen 57: Vista en plano de la sección de la nube de puntos.**



**Imagen 58: Vista en perspectiva de la rebanada a la nube de puntos.**



**Imagen 59: Vista en plano de la rebanada a la nube de puntos.**



**Imagen 60: Planta del área levantada a través de la rebanada a la nube de puntos.**

## 5 RESULTADO DE LA INVESTIGACION

Por fin, aquí tenemos algunos de los resultados del trabajo.

- Nubes de puntos unidas y texturizada.

En la siguiente *full plan view* en Autodesk Recap es posible ver las posiciones desde donde se han tomados los datos.

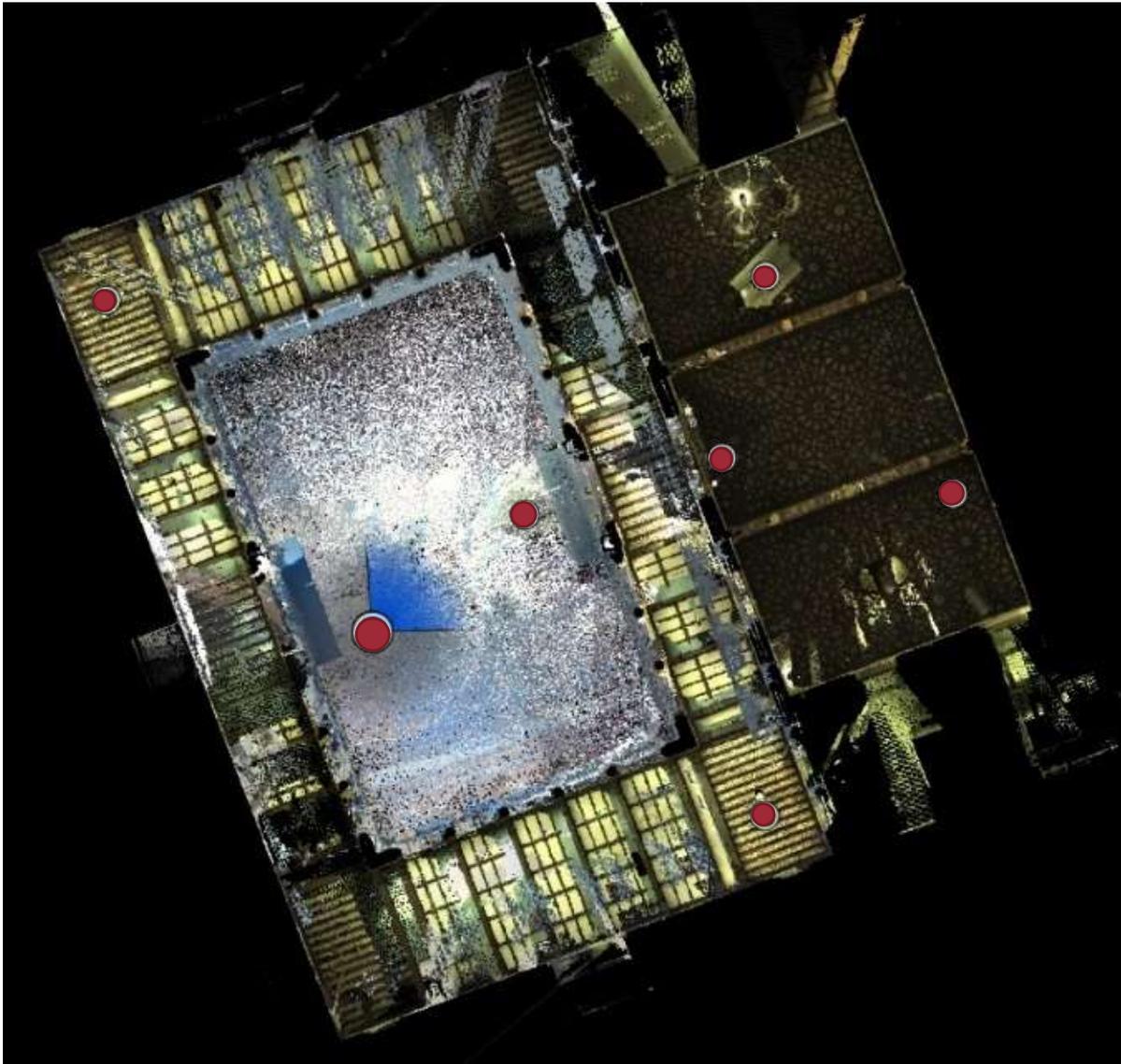


Imagen 61: Nube de puntos completa en plano.



Imagen 62: Vista en perspectiva de la nube de puntos completa.

- Algunas de las vistas reales en Autodesk ReCap.

En estas vistas reales en Recap son visibles algunos elementos esféricos que identifican el posicionamiento del escáner láser desde donde se han tomados los datos.



Imagen 63: Real view desde la posición 1.



Imagen 64: *Real view* desde la posición 3.

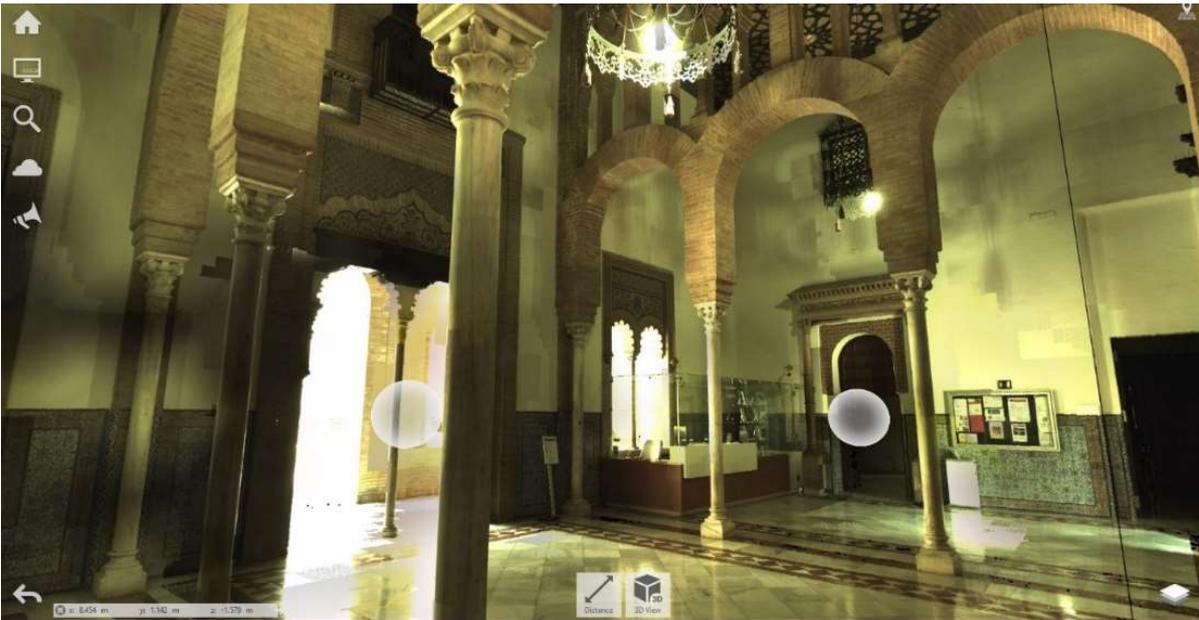


Imagen 65: *Real view* desde la posición 6.

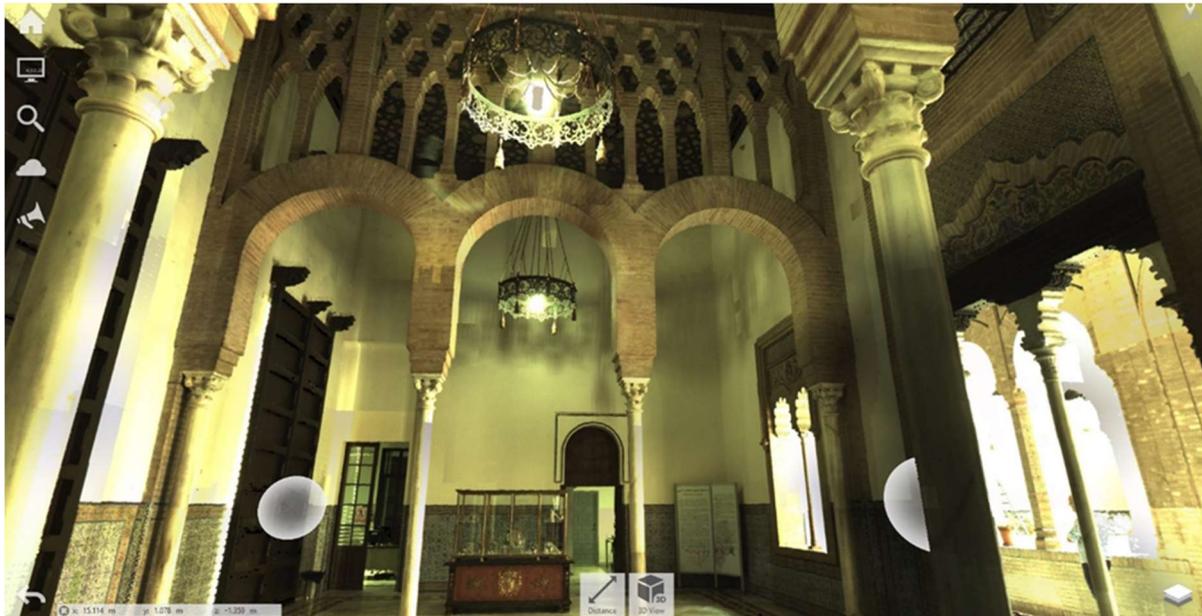


Imagen 66: Real view desde la posición 7.

- Cobertura de los posicionamientos.

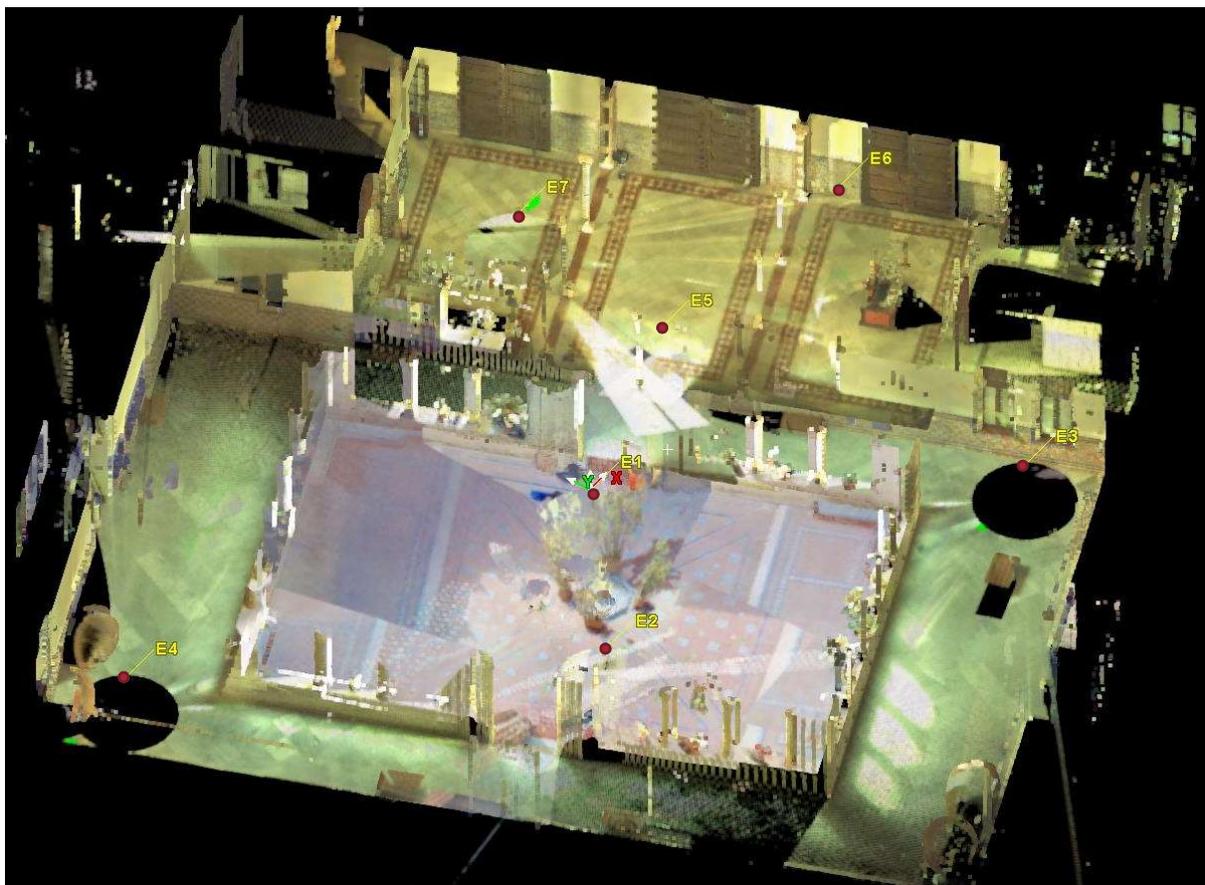
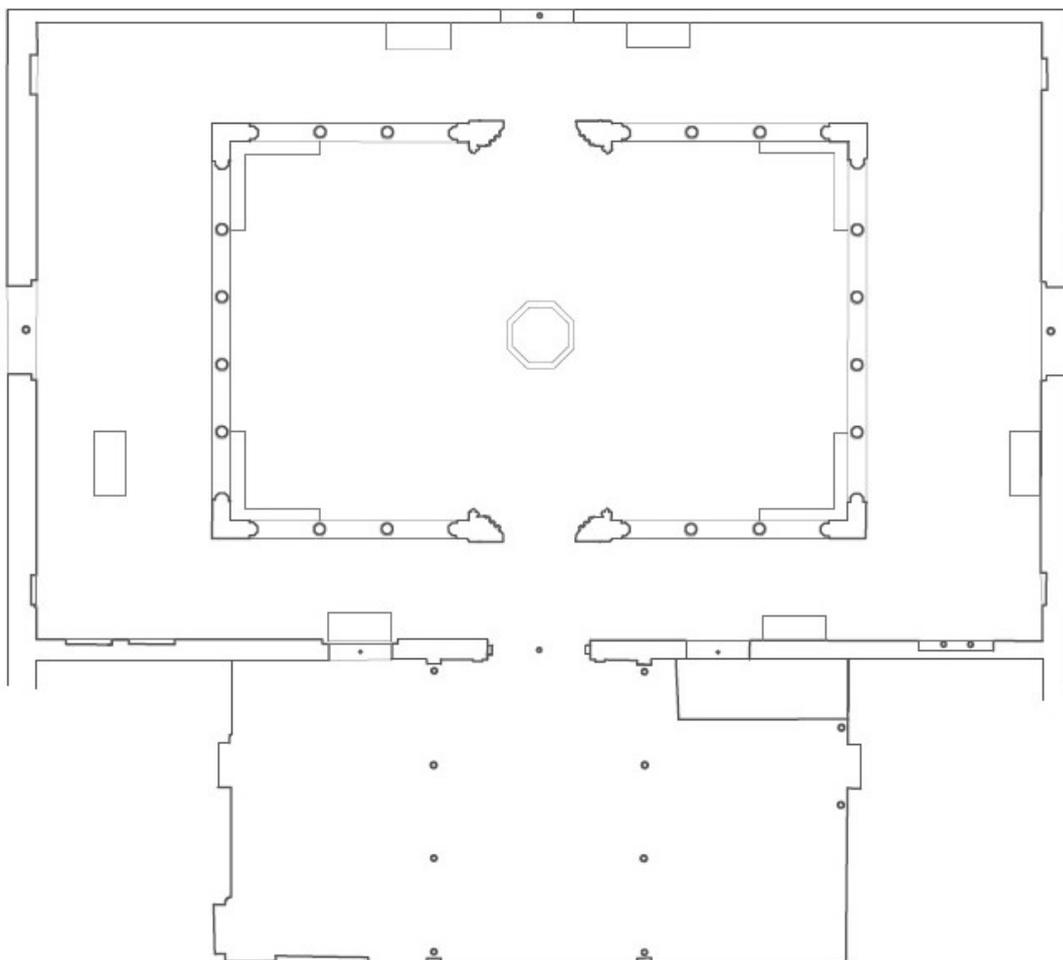


Imagen 67: Perspectiva seccionada donde se puede apreciar el recubrimiento de los posicionamientos.

- Planta del área levantada a partir de la nube de puntos importada en AutoCAD



**Imagen 68: Planta del área escaneada en escala 1:20**

## 6 CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue la utilización de la herramienta Depthmap para la optimización de los posicionamientos desde donde ejecutar una toma de datos mediante escáner láser para el levantamiento de un espacio interior.

En esta exposición se ha enfatizado en que Depthmap es un *software* diseñado para realizar análisis de grafo de visibilidad de sistemas arquitectónicos y urbanos, y nunca fue aplicado al ámbito del levantamiento.

A través de este trabajo y con la aplicación en concreto a un caso de estudio, se ha obtenido una adaptación de esta herramienta al problema de la determinación de los posicionamientos óptimos para conseguir un correcto levantamiento de un espacio interior.

Mediante Depthmap ha sido posible a partir del primer paso de la construcción del grafo de visibilidad y de su análisis (*Visibility Graph Analysis*), determinar inmediatamente cuáles son los puntos con la mayor visibilidad, es decir, cuáles son los posicionamientos a partir de los cuales es posible levantar el mayor número de puntos posibles. Es a partir de uno de estos puntos que empieza el itinerario.

Además, en el mapa de conectividad (como se puede ver en las Imágenes 27 y 49) también es posibles localizar las zonas del área a levantar que son menos visibles, o más bien, que son visibles desde pocos puntos, y esto es muy útil para determinar desde el principio cuales son las eventuales complejidades para la correcta y completa toma de datos.

Después, a través de la construcción aproximada de la isovista relativa a una específica localización (*Visibility Step Depth*), seleccionando cada vez un punto en el plano en Depthmap, ha sido posible tener una idea del área cubierta por un escaneo realizado en ese punto.

Esto es de fundamental importancia para los profesionales que trabajan en el ámbito del levantamiento porque, al final de un análisis de visibilidad de este tipo, es posible comprobar de antemano si, a través de los posicionamientos programados, se hace una toma de datos completa del área a levantar y si entre los escaneos hay un oportuno solape.

Entonces, se puede decir que a través de Depthmap es posible encontrar previamente cuáles y cuantos son los mejores puntos de estacionamiento para el escáner láser para garantizar el correcto levantamiento de un espacio interior.

Además, pueden destacarse las siguientes conclusiones sobre el uso de Depthmap en el ámbito de un proyecto de levantamiento:

- Es una herramienta sencilla tanto en el su empleo cuanto en la manera de mostrar los resultados de sus análisis.
- A través de su uso es posible una simple y rápida organización del proyecto de levantamiento.
- Sirve como ayuda para determinar los posicionamientos óptimos desde donde ejecutar los escaneos e individualar eventuales criticidades.

- Permite conseguir un ahorro de tiempo, y, en consecuencia, de dinero, en el desarrollo de las operaciones de levantamiento de un espacio arquitectónico.

## 7 LINEAS DE INVESTIGACION ABIERTAS

Como continuación de este trabajo, se pueden seguir, entre otras, las siguientes líneas futuras:

- Comparación de los resultados de este trabajo, en términos de optimización en el posicionamiento del escáner láser, con otros obtenibles a través del uso de diferentes *softwares* para el análisis de sintaxis espacial que, como Depthmap, gracias a algunos indicadores obtenidos desde este análisis, permiten de haber una idea previa del área de recubrimiento de un escaneo.
- Modelado del problema del análisis de visibilidad en tres dimensiones.
- Extensión del levantamiento del Pabellón Mudéjar para la obtención de una documentación gráfica completa del edificio.

## 8 TABLA DE ILUSTRACIONES

Imagen 1: Un posible flujo de trabajo con escáner láser terrestre. (Lerma García & Biosca Tarongers, 2008).....	9
Imagen 2: Instrumentos tradicionales de medición para el levantamiento directo. (Bianchini).....	11
Imagen 3: Ejemplos de croquis. (Docci & Maestri, 2009) .....	11
Imagen 4: Estación topográfica de última generación. Leica Geosystem.....	13
Imagen 5: Escáner Láser de última generación. Leica Geosystem.....	13
Imagen 6: Resultado de la toma con escáner 3D de la Fortezza da basso de Florencia. (MicroGeo , s.f.) .....	14
Imagen 7: Principio de la triangulación fotogramétrica o Bundle Adjustment (Russo, Remondino, & Guidi, 2011) .....	16
Imagen 8: Espectro electromagnético. ....	18
Imagen 9: Esquema de funcionamiento de un laser escaner de triangulación (Russo, Remondino, & Guidi, 2011). ....	20
Imagen 10: Principio de funcionamiento de un escáner láser por tiempo de vuelo (Lerma García & Biosca Tarongers, 2008). ....	21
Imagen 11: Principio de funcionamiento de un escáner láser por diferencia de fase (Lerma García & Biosca Tarongers, 2008) .....	22
Imagen 12: Registro de dos nubes de puntos (MicroGeo , s.f.).....	23
Imagen 13: Integración espacial de Berlín en 1989 y 2010. Anna Rose and Christian Schwander at Space Syntax Limited (Space Syntax Network ). ....	32
Imagen 14: En un espacio euclídeo $E^3$ , sea $D$ una región simplemente conectada, delimitada por la frontera $\partial D$ . En $D$ , un entorno visual $E$ está definido como el conjunto de superficies reales, teniendo en cuenta su condición espacial (Benedikt, 1979). ....	33
Imagen 15: Ejemplo de isovista generada desde una localización en una sencilla planta cuadrada con obstáculo central en forma de “T” (Abajo & Delgado). ....	33
Imagen 16: Tres diferentes isovistas (Benedikt, 1979) .....	34
Imagen 17: Ejemplo de grafo. ....	35
Imagen 18: Esquema del plano de Königsberg (Euler, 1736).....	36
Imagen 19: Mapa del mundo coloreado de verde, amarillo, azul y rojo. ....	37
Imagen 20: Mapa y grafo dual asociado. ....	38
Imagen 21: Mapa de metro.....	39
Imagen 22: Escáner Láser Leica C10 sobre trípode. Fuente Leica Geosystem.....	41
Imagen 23: Cámara panorámica iSTAR 360°.....	42
Imagen 24: Café de Paris (Aníbal González: el arquitecto de aquella Sevilla, s.f.).....	43
Imagen 25: Plaza de España. Elaboración propia.....	44
Imagen 26: Fachadas del proyecto de Aníbal González para la basílica de la Milagrosa. (Aníbal González: el arquitecto de aquella Sevilla, s.f.) .....	45
Imagen 27: Ubicación.....	46
Imagen 28: Puerta principal (Exposicion iberoamericana de sevilla 1929, s.f.).....	47
Imagen 29: Patio.....	47
Imagen 30: Planta esquematizada del pabellón (Exposicion iberoamericana de sevilla 1929, s.f.).....	48
Imagen 31: Fachada principal del Pabellón Mudéjar en Plaza de América. ....	49
Imagen 32: Tinajas modeladas expuestas en la galería del patio de la planta principal (Museo de Artes y Costumbres Populares de Sevilla, s.f.).....	50
Imagen 33: Plano de circulación de la planta principal (Museo de Artes y Costumbres Populares - propuestas de recorrido, s.f.).....	51

Imagen 34: Plano de circulación de la planta semisótano (Museo de Artes y Costumbres Populares de Sevilla, s.f.; Museo de Artes y Costumbres Populares - propuestas de recorrido, s.f.).	52
Imagen 35: Mallado del sistema (Abajo & Delgado).	54
Imagen 36: Rellenado de malla (Abajo & Delgado).	55
Imagen 37: Mapa de colores relativo al tamaño del entorno o conectividad (Abajo & Delgado).	55
Imagen 38: El sistema dividido en regiones según la distancia a la localización inicial (Abajo & Delgado).	56
Imagen 39: Los vértices unidos a v mediante una arista conforman su entorno y la isovista de la localización v (Abajo & Delgado).	58
Imagen 40: Grafos con diferente coeficiente de agrupamiento (Abajo & Delgado).	59
<b>Imagen 41: Esquema del panóptico de Bentham (Abajo &amp; Delgado).</b>	60
Imagen 42: Coeficiente de desplazamiento para una configuración en “T” (Abajo & Delgado).	61
Imagen 43: Creación de la malla.	62
Imagen 44: Relleno de la malla.	63
Imagen 45: Tamaño del entorno o conectividad.	64
Imagen 46: Visual Step Depth 1, o sea la isovista de la posición 1.	65
Imagen 47: Visual Step Depth 2, o sea la isovista desde la posición 2.	65
Imagen 48: Visual Step Depth 3, o sea la isovista desde la posición 3.	66
Imagen 49: Visual Step Depth 4, o sea la isovista desde la posición 4.	67
Imagen 50: Visual Step Depth 5, o sea la isovista desde la posición 5.	67
Imagen 51: Visual Step Depth 6, o sea la isovista desde la posición 6.	68
Imagen 52: Visual Step Depth 7, o sea la isovista desde la posición 7.	68
Imagen 53: Planta con los posicionamientos obtenidos en Depthmap.	69
Imagen 54: Los cuatro fotos de la cámara panorámica desde el posicionamiento 2.	70
Imagen 55: Nube de puntos completa importada en AutoCAD.	71
Imagen 56: Vista en perspectiva de la sección.	71
Imagen 57: Vista en plano de la sección de la nube de puntos.	72
Imagen 58: Vista en perspectiva de la rebanada a la nube de puntos.	72
Imagen 59: Vista en plano de la rebanada a la nube de puntos.	73
Imagen 60: Planta del área levantada a través de la rebanada a la nube de puntos.	73
Imagen 61: Nube de puntos completa en plano.	74
Imagen 62: Vista en perspectiva de la nube de puntos completa.	75
Imagen 63: <i>Real view</i> desde la posición 1.	75
Imagen 64: <i>Real view</i> desde la posición 3.	76
Imagen 65: <i>Real view</i> desde la posición 6.	76
Imagen 66: <i>Real view</i> desde la posición 7.	77
Imagen 67: Perspectiva seccionada donde se puede apreciar el recubrimiento de los posicionamientos.	77
Imagen 68: Planta del área escaneada en escala 1:20.	78

## 9 BIBLIOGRAFIA

- (s.f.). Obtenido de Museo de Artes y Costumbres Populares de Sevilla: <http://www.museosdeandalucia.es/web/museodeartesycostumbrespopularesdesevilla>
- (s.f.). Obtenido de Autodesk: <https://www.autodesk.com/products/recap/overview>
- «La Exposición Iberoamericana». (17 de junio de 1926). *ABC*, 23.
- Abajo, E., & Delgado, J. M. (s.f.). Una propuesta del área de matemáticas para el taller de arquitectura: percepción del espacio mediante parámetros asociados a la visibilidad.
- Almagro, A. G. (2004). *Levantamiento arquitectónico*. Universidad de Granada.
- Almagro, A., Carbonara, G., Casiello, S., Coppo, S., Cundari, C., Fiore, G. d., . . . Starace, F. (1991). Carta del Rilievo. *Il rilievo dei beni architettonici per la conservazione*. Napoli.
- Almagro, A., Carbonara, G., Casiello, S., Coppo, S., Cundari, C., Fiore, G. d., . . . Starace, F. (2000). Declaración sobre el levantamiento. *Il rilievo dei beni architettonici per la conservazione*. Roma.
- Aníbal González. *Un museo para Sevilla*. (s.f.). Obtenido de <https://anibalgonzalez.webnode.es/nosotros/>
- Aplicadas, C. d. (s.f.). *Apuntes de teoría. Principios de fotogrametría*. Universidad Nacional del Nordeste, Facultad de Ingeniería.
- (s.f.). *Apuntes de teoría. Principios de fotogrametría*. Universidad Nacional del Nordeste, Facultad de Ingeniería. Obtenido de <http://ing.unne.edu.ar/dep/goeciencias/fotointer/pub/teoria2011/parte01/fotom.pdf>
- (s.f.). *Apuntes de teoría. Principios de fotogrametría*. Universidad Nacional del Nordeste, Facultad de Ingeniería. Obtenido de <http://ing.unne.edu.ar/dep/goeciencias/fotointer/pub/teoria2011/parte01/fotom.pdf>
- Balletti, Guerra, Fregonese, & Monti. (s.f.). *Appunti di Fotogrammetria*. IUAV (Istituto Universitario di Architettura di Venezia). Obtenido de <http://www.iuav.it/SISTEMA-DE/Laboratori1/index.htm>
- Barrera Vera, J. A. (2006). *Aplicación de tecnologías innovadoras en la documentación geométrica del Patrimonio Arquitectónico y Arqueológico*. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla. Obtenido de <http://fondosdigitales.us.es/tesis/tesis/2044/aplicacion-de-tecnologias-innovadoras-en-la-documentacion-geometrica-del-patrimonio-arquitectonico-y-arqueologico/>
- Benedikt, M. L. (1979). *To take hold of space: isovist and isovist fields*. University of Texas at Austin, School of Architecture , Austin.
- Bianchini, M. (s.f.). *Manuale di rilievo e di documentazione digitale in archeologia*. Obtenido de Rilievo Archeologico.it: [http://www.rilievoarcheologico.it/manuale\\_rilievo8\\_000006.htm](http://www.rilievoarcheologico.it/manuale_rilievo8_000006.htm)
- Cabrera Revuelta, E. (2017). *Optimización en el posicionamiento para la realización de un levantamiento arquitectónico*. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla.
- Centro geociencias aplicadas. (s.f.). *Apuntes de teoría. Principios de fotogrametría*. Universidad Nacional del Nordeste, Facultad de Ingeniería.
- Docci, M., & Maestri, D. (2009). *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*. Bari: Laterza.
- Euler, L. (1736). *Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis*.

- Exposicion iberoamericana de sevilla 1929*. (s.f.). Obtenido de Pabellon Mudejar: <http://exposicioniberoamericanadesesevilla1929.blogspot.com/2010/04/pabellon-mudejar.html>
- Fritsch, R., & Fritsch, G. (1998). *The Four-Color-Theorem*. Springer.
- Girelli, V. (s.f.). *Tecniche digitali per il rilievo, la modellazione tridimensionale e la rappresentazione nel campo dei beni culturali*. Tesi di Dottorato, Università di Bologna. Obtenido de <http://amsdottorato.unibo.it/310/1/Girelli.pdf>
- Gonthier, G. (2008). Formal Proof—The FourColor Theorem.
- Homenaje al arquitecto insigne D. Aníbal González. (1 de diciembre de 1926). *ABC*, 20.
- Leica Geosystem*. (s.f.). Obtenido de <https://leica-geosystems.com/es-MX>
- Lerma García, J. L., & Biosca Tarongers, J. M. (2008). *3D RiskMapping. Teoría y práctica del Escaneado Laser Terrestre. Material de aprendizaje basado en aplicaciones prácticas. Versión 5*.
- Macía, F. (s.f.). *Historia Arte Sevilla*. Obtenido de <http://historiartesevilla.blogspot.com/2013/10/pabellon-mudejar.html>
- MicroGeo*. (s.f.). Obtenido de <http://www.microgeo.it/it/default.aspx>
- Morales Martínez, A. J. (2006). Sevilla la Exposición Ibero-americana de 1929 y la Exposición Universal de 1992. *Artigrama*(21).
- Movellán, A. V. (1979). *Arquitectura del Regionalismo en Sevilla 1900- 1935*. Excma, Diputación Provincial de Sevilla,.
- Museo de Artes y Costumbres Populares - propuestas de recorrido*. (s.f.). Obtenido de <http://www.museosdeandalucia.es/web/museodeartesycostumbrespopularesdesesevilla/propuestas-de-recorrido>
- Pérez Escolano, V. (1973). *Aníbal González*. Secretariado de Publicaciones de la Diputación Provincial de Sevilla.
- Russo, M., Remondino, F., & Guidi, G. (2011). *Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico*.
- Sampaolesi, P. (1973). *Discorso sulla metodologia generale del restauro dei monumenti*. Firenze.
- SevillaMía tours*. (s.f.). Obtenido de <http://sevillamiatours.com/anibal-gonzalez-arquitecto-aquella-sevilla/>
- Space Syntax Network*. (s.f.). Obtenido de <http://www.adip.tu-berlin.de/wp-content/uploads/2012/04/2012-adip-gruppenaufgaben-3-space-syntax.pdf>
- Turner, A. (2004). *Depthmap 4 — A Researcher's Handbook*. Bartlett School of Graduate Studies, UCL, London.
- Turner, A. (junio 2004). *Depthmap 4 — A Researcher's Handbook*. Bartlett School of Graduate Studies, UCL, London.
- Turner, Doxa, O'Sullivan, & Penn. (2001). *From isovists to visibility graphs: a methodology for the analysis of architectural space*. Obtenido de <http://discovery.ucl.ac.uk/160/1/turner-doxa-osullivan-penn-2001.pdf>

Tutte, W. T. (2001). *Graph Teory*. Cambridge University Press.

UCL. (s.f.). Obtenido de <https://www.ucl.ac.uk/bartlett/architecture/research/space-syntax/depthmapx>

Zevi, B. (1957). *Architecture as space*. New York: Horizon Press.