ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA. BARCELONATECH
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona
Departamento de Construcciones Arquitectónicas I
Doctorado en Gestión y Valoración Urbana y Arquitectónica

Tesis Doctoral

GESTIÓN Y EXPLOTACIÓN DE LA INFORMACIÓN TLS DE 3D A 2D Y 2.5D

Análisis, selección y síntesis a partir de la tecnología Escáner Láser Terrestre

Realizada por:
Arq. Juan Manuel Corso Sarmiento

Directores de la tesis:
Dr. Arq. Josep Roca Cladera
Dr. Felipe Buill Pozuelo

Barcelona, 2015

Índice

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES 11
1.1 INTRODUCCIÓN 11
1.2 MOTIVACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN 12
1.3 PROBLEMÁTICA Y OBJETIVOS 14
1.4 ESTRUCTURA DEL TRABAJO 16

CAPÍTULO 2. PRINCIPIOS DEL ESCÁNER LÁSER 19
2.1 CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO 19
2.2 ANTECEDENTES DE IMÁGENES TLS EN LA CONSERVACIÓN DE EDIFICIOS PATRIMONIALES 20
2.2.1 INSPECCIÓN GEOMÉTRICA TLS, INFORMACIÓN XYZ. 20
2.2.2 DOCUMENTACIÓN DE DAÑOS EN LAS SUPERFICIES DE LOS EDIFICIOS, INFORMACIÓN COLOR E INTENSIDAD. 23
2.3 ESTADO DEL ARTE TECNOLOGÍA DE ESCÁNER LÁSER 27
2.3.1 SISTEMAS DE PULSO, ESCÁNER DE TIEMPO DE VUELO 27
2.3.2 SISTEMAS DE CAMBIO DE FASE 28
2.3.3 ESCÁNER LÁSER AEROTRANSPORTADO 28
2.3.4 CARTOGRAFÍA (*MOBILE LÁSER SCANNING* MLS) 29
2.4 ESTADO DEL ARTE DIGITALIZADORES ÓPTICOS ACTIVOS 29
2.4.1 SISTEMA DE TRIANGULACIÓN ÓPTICA 30
2.4.2 SISTEMA DE LUZ ESTRUCTURADA 30
2.5 ANÁLISIS DEL ERROR TLS 31
2.6 METODOLOGÍAS TLS RELACIONADAS CON EL PATRIMONIO 33
2.6.1 METODOLOGÍA DEL LMVC 36
2.7 PROCESOS DE UNIÓN ENTRE POSICIONES 38
2.7.1 UNIÓN MANUAL 39
2.7.2 UNIÓN AUTOMÁTICA, MÉTODO ICP Y MÉTODO DARCES 40
2.7.3 MÉTODOS BASADOS EN LA DETECCIÓN DE LAS ENTIDADES GEOMÉTRICAS 43
2.7.4 PRECISIÓN Y EXACTITUD ALCANZADA. RENDIMIENTO ALCANZADO 44
2.8 INFORMACIÓN TLS 46
2.8.1 INFORMACIÓN DE INTENSIDAD ENTRE ESCÁNERES TLS 46
2.8.2 LA FOTOGRAFÍA EN LA TECNOLOGÍA TLS 46
2.8.3 CORRECCIÓN COLOR ENTRE PANORAMAS 50
2.8.4 PROYECCIÓN FOTOGRÁFICA A UNA NUBE DE PUNTOS 52
2.8.5 TRANSFERENCIA DE ATRIBUTOS ENTRE NUBES DE PUNTOS 53
2.8.6 RESOLUCIÓN DE LA NUBE DE PUNTOS 54

CAPÍTULO 3. CLASIFICACIÓN DE ENTORNOS COMPLEJOS 59
3.1 CONCEPTO DE LEVANTAMIENTO ARQUITECTÓNICO 59
3.1.1 EL ANÁLISIS DE LA ARQUITECTURA 61
3.1.2 LA CLASIFICACIÓN EN ARQUITECTURA 64
3.1.3 LAS PARTES Y EL TODO 65
3.2 ESTADO DEL ARTE CLASIFICACIÓN TLS 67
3.2.1 ANTECEDENTES DE SEGMENTACIÓN EN EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES 68
3.2.2 SEGMENTACIÓN BASADA EN EL PRINCIPIO DE FUSIÓN 69
3.2.3 LA SEGMENTACIÓN POR CRECIMIENTO DE LA SUPERFICIE 70
3.2.4 SEGMENTACIÓN POR PERFIL DE ESCANEO 72
3.2.5 SEGMENTACIÓN POR LA DIVISIÓN Y FUSIÓN 73

3.2.6 Segmentación por el reconocimiento de formas geométricas 74
3.3 Clasificación de superficies naturales y geométricas en entornos complejos 77
3.3.1 Clasificación de superficies naturales 79
3.3.2 Clasificación RANSAC de planos múltiples 84
3.4 Clasificación arquitectónica, caso de estudio del patrimonio industrial de las Calderas de Fabra i Coats 88
3.4.1 Adquisición de datos TLS 89
3.4.2 Metodología de clasificación y segmentación 92
3.4.3 Clasificación en relación a la evolución histórica, la función y el programa arquitectónico 94
3.4.4 Difusión del Patrimonio: el modelo virtual 96
3.5 Clasificación Urbana, caso de estudio del casco histórico de Tossa de Mar, Vila Vella 98
3.5.1 Georreferenciación y verticalidad basada en el ICC 100
3.5.2 Limpieza de las nubes de puntos 101
3.5.3 Clasificación volumétrica espacial 102
3.5.4 Ejemplos de estructurar a escala Urbana 107

CAPÍTULO 4. CONVERSIÓN 3D A 2D Y 2.5D 113
4.1 Antecedentes de conversión de nubes de puntos TLS de 3D a 2.5D 113
4.2 Problemática de la medida y representación de los elementos patrimoniales 114
4.2.1 La medida TLS y la documentación de la forma 115
4.2.2 La representación del levantamiento arquitectónico 116
4.2.3 Temáticos y representación gráfica en levantamientos 118
4.2.4 Métodos de representación 120
4.2.5 Escalas y precisiones en relación a los objetivos propuestos 122
4.3 Desdoblamiento del modelo 3D 124
4.3.1 Caso de estudio, desdoblamiento de los murales de la capilla de Sant Miquel 125
4.3.2 Caso de estudio, desdoblamiento de la escala Urbana 128
4.4 Construcción y optimización de imágenes TLS como base de datos 136
4.4.1 Malla regular de puntos. 136
4.4.2 Vectorial 137
4.4.3 Ráster y Grids 139
4.5 Estructurar la información de 3D a 2D y 2.5D 139
4.5.1 Formato LAS y construcción basada en datos TLS 140
4.5.2 De LAS a RÁSTER 144
4.5.3 Modelos Digitales 2D y 2.5D 149
4.5.4 Clasificación ráster 152

CAPÍTULO 5. CASOS DE ESTUDIO 155
5.1 Introducción 155
5.2 Caso de estudio 1. Herramientas para el análisis morfológico de *Fabra i Coats* en Barcelona 159
5.2.1 Barcelona industrial, caso de estudio de Fabra I Coats 159
5.2.2 Levantamiento con Escáner Láser Terrestre 160
5.2.3 Método de unión de nubes de puntos ICP *Iterative Closest Point* 161
5.2.5 Información geométrica, la forma de la fachada 161
5.2.6 Deformación de la fachada y detalle de los materiales 164
5.2.7 Límites de los elementos que definen la fachada 168

5.2.8 Corregistrar, levantamientos paralelos 171
5.2.9 Conclusiones 173
5.3 Caso de estudio 2: Análisis de la geometría en fachadas con detalles en piedra. La Catedral Vieja de Lérida (La Seu Vella). 174
5.3.1 Análisis geométrico de la superficie 176
5.3.2 Toma de datos TLS 176
5.3.3 Bases de datos 3D que resaltan características del bien arquitectónico 177
5.3.4 Conversión 3D a 2D y 2.5D 180
5.3.5 Comparativa 3D – 2D y 2.5D 187
5.3.4 Aplicación del levantamiento 191
5.3.5 La arqueología en la arquitectura (Análisis estratigráfico) 192
5.3.6 Consideraciones para la restauración y conservación 194
5.3.7 Planos vectoriales 197
5.3.8 Conclusiones 201
5.4 Conclusiones de las entrevistas 202

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES 207

BIBLIOGRAFÍA 265

Índice ilustraciones

Ilustración 1: Croquis de campo, levantamiento estratigráfico, Castillo de Monzón, Huesca..... 15
Ilustración 2: Estudio de mapeo de una superficie de fachada interior, 32 colores..... 21
Ilustración 3: Morfología del ábside comparado a un plano, datos del 2001 y 2012 después de un terremoto de Emilia (valores en metros)..... 22
Ilustración 4: Abombamiento horizontal de una pieza de mármol de forma manual y TLS, derecha temático TLS..... 22
Ilustración 5: Ejemplo de catalogación de eventos de caídas de rocas 23
Ilustración 6: Los resultados de una clasificación de intensidad TLS, de izquierda a derecha: Isodata classification (8 categorías); k-means classification (8 categorías); Fuzzy k-means (8 categorías). Escáner TRIMBLE GX200..... 25
Ilustración 7: Ortoimagen de alta resolución de la "Trivulzio Pala" (1497) en Arcgis, ráster y vectorial, para estudiar datos de diferentes registros 26
Ilustración 8: A) Detalle del escáner de alta resolución de la Mona Lisa, color y relieve, con la presencia de una púa, panel rasurado, y los detalles del patrón craquelado. B) Deformación del panel de álamo. 26
Ilustración 9: (A) Representación de la distribución espacial del error. (B) Grado de ambigüedad en la distancia de distintos TLS 32
Ilustración10: CyArk 3D Heritage Archive..... 34
Ilustración 11: Metodología de levantamiento de escáner láser típica 36
Ilustración 12: Metodología para la generación de orto imágenes LMVC 37
Ilustración 13: Equipos del LMVC, tiempo de vuelo, diferencia de fase y triangulación..... 38
Ilustración 14: Ejemplos de objetos reflectantes: La esfera es del Faro Focus^{3D} y los cilindros del RIEGL z420i 40
Ilustración 15: Ejemplo del registro interior de las Calderas de Fabra i Coats 41
Ilustración 16: El punto más cercano al plano tangente a una superficie en un punto conocido ... 41
Ilustración 17: Detección de líneas de referencia entre posiciones como proceso de registro, Calderas de Fabra i Coats..... 43
Ilustración 18: Un escáner de láser de una sección excavada, izquierda información de la intensidad y derecha un registro estratigráfico de la zanja hecha por un arqueólogo en el lugar 46
Ilustración 19: Ejemplo de iluminación (a) 6/5/2003 14:29 f/5.6 1/350s, (b) 9/5/2003 10:40 f/2.8 1/225s, ciudad Bath 47
Ilustración 20: Corregir sombras e iluminación de forma digital. Levantamiento del casco histórico de Cadaqués, LMVC 48
Ilustración 21: Balance de blancos, levantamiento del casco histórico de Cadaqués, LMVC..... 49
Ilustración 22: Relación entre fotos de panoramas HDRI sin editar (entradas de luz distantes). Escaneo al techo y escáner en 45 grados. Museo Marítimo de Barcelona, naves medievales. 51
Ilustración 23: Panorama del Faro Focus^{3D}, error de ponderación de la exposición afectada por la luz de la lámpara (medición zenit). Levantamiento de la exposición micro coches MUHBA..... 51
Ilustración 24: Proyección de un conjunto de imágenes a una nube de puntos 52
Ilustración 25: Transferencia del atributo de color desde Meshlab. Las imágenes superior son las tres posiciones TLS, medio y abajo la comparación entre la nube de puntos antes de aplicar el filtro de transferencia de atributos y el resultado final. 54
Ilustración 26: Nube de puntos con posiciones identificables por la resolución y detalle de la información en color 55
Ilustración 27: Una posición TLS y la disminución de resolución a partir de la distancia, con un ángulo de escaneo de 0.08º, manteniendo una resolución de 1 punto por cm hasta los 12 metros. Museo Marítimo de Barcelona..... 56

Ilustración 28: Comparación de toma de datos de intensidad y color. En planta y en el panorama. La intensidad recoge un 25% más de información que el color en promedio. 56
Ilustración 29: Minimizar el traslape entre posiciones TLS, mediante la sectorización en la toma de datos, evitando relacionar información de color entre panoramas 57
Ilustración 30: Levantamiento de Madinat Al-Zahra. Casa de Yafar, estado actual y teórico 60
Ilustración 31: Análisis de interrelaciones de elementos y sistemas de la villa Savoye (le Corbusier, 1928-1931) 62
Ilustración 32: Génesis y articulación del volumen del edificio Humana (Louisville, Kentuchy), Michael Graves, 1982 63
Ilustración 33: Ejemplos de clasificación de tipologías 64
Ilustración 34: Descripción semántica de la morfología y material en una estructura de árbol 66
Ilustración 35: Sistema generativo 66
Ilustración 36: Segmentación de panoramas TLS y resultado de la segmentación corregida integrando las tres segmentaciones anteriores. La de rango, normales y color 69
Ilustración 37: Ejemplo de clasificación por crecimiento de la superficie. 70
Ilustración 38: Segmentación de los bordes y clasificación de superficies planas 71
Ilustración 39: Clasificación de elementos de fachada y generación de polilíneas de contorno 72
Ilustración 40: Estructura iterativa octree para encontrar puntos coplanares 73
Ilustración 41: A) Ejemplo de un escáner aéreo LiDAR, B) subdivisión octree, C) unión de los bordes del plano que mejor encaja, D) Ejemplo LiDAR escala urbana, E) Resultado de la división 74
Ilustración 42: Reconocimiento de intersección de planos y detección de líneas 75
Ilustración 43: La normal usando en relación a un plano y efecto de aumentar el ruido en la estimación del error 75
Ilustración 44: Partición geométrica, optimización derecha 76
Ilustración 45: Detección de tuberías con la trasformada de Hough 76
Ilustración 46: Clasificación por “rugosidad” y clasificación por planos de suelos y techos, programa comercial para la clasificación de escáner LiDAR aéreo Vrmesh 81
Ilustración 47: Superior esferas de puntos vecinos 81
Ilustración 48: Izquierda ejemplo de distribución de puntos para definir su carácter 1D-2D-3D, derecho ejemplo de características de una clasificación a múltiples escalas. Ejemplo del rio Otira. 82
Ilustración 49: Diagrama de la clasificación del rio Otira 83
Ilustración 50: Resultado de la clasificación del rio Otira, en 22 escalas, desde 2cm hasta 1m. A) Base de datos, B) clasificación CANUPO, C) edición usuario, D) sin clasificar 28.2% del total 83
Ilustración 51: Clasificación natural de un segmento de Vila Vella, Tossa de Mar 84
Ilustración 52: Izquierda detección de Superficies horizontales Slope 74% y mayores de 1.2 m de altura, Suelo: 618.541 puntos / Vegetación: 64.061 puntos / Edificio: 34.728 puntos. Derecha proyección al suelo 85
Ilustración 53: Izquierda extracción de plano de fachada y visualización de puntos extraídos, proceso RANSAC plane, en MATLAB 86
Ilustración 54: Detección de planos múltiples, edificio adjunto a las calderas de Fabra i Coats 88
Ilustración 55: Detección de planos en una fachada de las calderas de Fabra i Coats 88
Ilustración 56: Unión entre posiciones proceso iterativo ICP 90
Ilustración 57: Comparación de resolución entre el Riegl z420i (izquierda) y el Faro Focus^{3D} (derecha) 91
Ilustración 58: Ortoimágenes arquitectónicas, comparativa entre Riegl z420i (izquierda) y el Faro Focus3D (derecha) 92
Ilustración 59: Selección por intensidad en procesos de limpieza de la nube de puntos 93
Ilustración 60: Clasificación del suelo RANSAC 93
Ilustración 61: Estructura de la base de datos (31 partes) 95
Ilustración 62: Temáticos de circulación y de las calderas 96
Ilustración 63: Manejo de archivos para su difusión 97

Ilustración 64: Densidad de puntos y resolución alcanzada 98
Ilustración 65: Patio de armas de la “Vila Vella” y torre de les Hores (pintura al óleo de Jacinto Conill) y “Silueta de la torre vigilante como testimonio de los peligros que acechaban desde el mar” 99
Ilustración 66: Estado actual, complejidad urbana 99
Ilustración 67: Georreferenciación e información complementaria al levantamiento (TLS 150 de control entre la información ICC - TLS) 100
Ilustración 68: Superior segunda limpieza manual, inferior limpieza de la información de intensidades. Izquierda información inicial y derecha sin los rangos de intensidad predefinidos .. 101
Ilustración 69: Clasificación CANUPO aplicada a entornos urbanos..... 103
Ilustración 70: Clasificación CANUPO de diferentes zonas (imagen superior) y unión de 4 zonas (inferior) 104
Ilustración 71: Clasificación CANUPO, entre elementos alargados (azul) y elementos volumétricos (rojo y verde)..... 104
Ilustración 72: Elementos identificados en fachadas. A) Vegetación adosada a las fachadas (muralla), B) Puertas y ventanas, C) Elementos *urbanos (farola)* 105
Ilustración 73: Comparación nube de puntos RGB y nube de puntos clasificada 106
Ilustración 74: Clasificación características técnicas de la información TLS 108
Ilustración 75: Clasificación histórica, define etapas de desarrollo y edificios singulares de conservación..... 110
Ilustración 76: Información de partida para realizar un análisis de circulación del casco histórico 111
Ilustración 77: Ejemplo de análisis automático de pendientes, basados en Thiessen polygons Voronoi diagram y su visualización en 3D 111
Ilustración 78: Mapas de desplazamiento como método de simplificación 3D y evaluación de los mapas de desplazamiento 114
Ilustración 79: Añadir información a las medidas TLS. RGB y Normales..... 119
Ilustración 80: Procesar la información de medidas para su análisis y representación..... 119
Ilustración 81: Representación usando falso color 120
Ilustración 82: LAS data set a Ráster, ejemplos de resolución e interpolación de datos. Murales capilla Sant Miquel..... 123
Ilustración 83: Homogenización del color entre panoramas 125
Ilustración 84: Calculo de normales. Izquierda modelo simplificado con color a 8815775 puntos, derecha información de las normales 126
Ilustración 85: Desdoblamiento de los planos en un archivo de nube de puntos. Superior RGB, inferior mapa de profundidades 128
Ilustración 86: Proceso de clasificación utilizado en relación al concepto de levantamiento 129
Ilustración 87: Clasificación características técnicas de la información TLS 129
Ilustración 88: Desdoblamiento de la información de fachada. Superior izquierda distancia entre nubes de puntos, superior derecha alineación de fachadas. Abajo fachada de la calle Oliver 130
Ilustración 89: Ráster de profundidades mínimas tematizado, calle Oliver 131
Ilustración 90: Modelos digitales de terreno y límites de los cambios de las superficies 131
Ilustración 91: Identificación del material del suelo analizando la información de intensidad, buscando identificar contornos de los materiales 132
Ilustración 92: Representación de las orientaciones de una cubierta a partir de un MDS en GIS 133
Ilustración 93: Clasificación 5 ROI y conversión en áreas vectoriales, de la vegetación baja..... 134
Ilustración 94: Vegetación alta en fachada y planta. Izquierda troncos, derecha hojas de la copa de los árboles 135
Ilustración 95: Izquierda TIN generado a partir de toda la nube de puntos sin clasificar. Derecha TIN del suelo y techos (cenital) de la misma selección, con un falso color que representa la altura 138

Ilustración 96: Operaciones entre categorías en una nube de puntos 140
Ilustración 97: Ejemplo de formato LAS, formato 3 141
Ilustración 98: Ejemplo de interacción con la información en un LAS DataBase 144
Ilustración 99: Modelo de creación de una Geodatabase basado en la información de elevación 146
Ilustración 100: RGB TLS filtrado en cada canal e intensidad TLS, filtrado y representado en falso color. Murales de Sant Miquel 146
Ilustración 101: Detalle de una fisura y huecos de una de las pinturas de los murales de Sant Miquel 147
Ilustración 102: Base de datos complementarios 148
Ilustración 103: Iluminación Hillshade de los murales de Sant Miquel, resaltando relieves de las superficies..... 151
Ilustración 104: Captura de la página web Murals sota la lupa, Monestir Pedralbes 153
Ilustración 105: Clasificación de la intensidad, entre superficies más reflectantes 1,2,3 y las menos reflectantes 4 y 5 154
Ilustración 106: Levantamiento TLS, perspectiva nube de puntos Fabra i Coats..... 159
Ilustración 107: Registro mediante el promedio de la distancia entre puntos de cada posición escaneada ICP 161
Ilustración 108: Segmento de fachada lateral en 3D. Izquierda modelo 3D texturizado, centro iluminación sobre el modelo y derecha análisis por curvatura RIMLS Robust Implicut MLS 163
Ilustración 109: A Información de color sin optimizar con el procesamiento de imágenes, B Color optimizado utilizando la información de intensidad. C vista en conjunto de las fachadas estudiadas 165
Ilustración 110: Metodología para el análisis geométrico de una fachada considerada plana..... 166
Ilustración 111: Clasificación por alturas del modelo digital de superficie proveniente del TLS y la clasificación del modelo digital de superficie sin la deformación de la fachada 167
Ilustración 112: Modelo digital de superficie generado a partir de la nube de puntos TLS y modelo digital de superficie sin la deformación de la fachada 167
Ilustración 113: Análisis de textura Second Moment de modelo digital de superficie a partir de la información TLS, basada en una matriz Co-ocurrence 169
Ilustración 114: Análisis de textura Second Moment de modelo digital de superficie sin deformación, basada en una matriz Co-ocurrence..... 169
Ilustración 115: Filtro Shader Relief. Izquierda nube de puntos e imagen Shader Relief en detalle. Derecha imagen Shader Relief..... 171
Ilustración 116: Planta de La Catedral Vieja de Lérida, zona del caso de estudio 174
Ilustración 117: Nube de puntos 3D..... 176
Ilustración 118: Análisis por curvatura y rugosidad en 3D, analizando las superficies en todas las direcciones..... 177
Ilustración 119: Normal, dirección de las superficies en horizontal y vertical 178
Ilustración 120: Clasificación de superficies naturales aplicado a edificios. Técnica usada clasificación CANUPO 179
Ilustración 121: Iluminación por oclusión ambiental y combinación con otros análisis como el de clasificación CANUPO 180
Ilustración 122: LAS dataset 2 en 3D, valor de elevación y ráster de rugosidad con una resolución de 0,5cm 181
Ilustración 123: Claustro y portadas de la Catedral. Resolución 0,5cm pixel, filtro para cada banda y recomposición como RGB 182
Ilustración 124: Modelo Digital de Elevaciones. Ráster Elevación falso color. Resolución 0,5cm pixel, interpola vacío de información en relación al pixel vecino 182
Ilustración 125: Ráster Hillshade 315º acimut 45 183
Ilustración 126: Análisis de pendientes..... 184

Ilustración 127: Ráster de pendientes obtenido mediante Spatial Analyst 185
Ilustración 128: Permite ampliar los detalles de la superficie 185
Ilustración 129: Ráster 2D de la iluminación por oclusión ambiental generado en una nube de puntos 3D 186
Ilustración 130: Comparativa de capas en 3D y en 2D (2.5D)..... 188
Ilustración 131: Comparativa entre la representación de iluminación por oclusión ambiental en 3D y los ráster 2D..... 189
Ilustración 132: Curvatura superficie 189
Ilustración 133: La Normal en 3D y en 2D 190
Ilustración 134: Clasificación e interpretación de la información en 3D y en 2D 190
Ilustración 135: Construcción de ráster en base a la normal, izquierda imagen de profundidades y derecha ráster de normales, al construirse a partir de la información de la normal se detallan mejor los bordes al promediar la superficie en relación a la dirección de esta..... 191
Ilustración 136: Efectos de alteración en la piedra (“mal de la piedra”)..... 195
Ilustración 137: Análisis de pendientes e iluminación en la identificación de la erosión de la piedra. 195
Ilustración 138: Documentación como herramienta para contrastar la porosidad de los materiales. Ejemplo de alveolización de la piedra en un muro interior. 196
Ilustración 139: Identificación de diferentes materiales. Probablemente se han perdido bloques completos, que ha habido que reponer con materiales similares. 196
Ilustración 140: Dibujos vectoriales a partir de los ráster de curvatura TLS..... 198
Ilustración 141: De planos ráster a planos vectoriales 199

Índice ecuaciones

Ecuación 1: Consolidación de las nubes de puntos (Láser grammetrie Terrestre)..... 42
Ecuación 2: Número mínimo para el cálculo de un plano RANSAC 86

Índice tablas

Tabla 1: Escalas de tolerancia y densidad de las nubes de puntos..... 35
Tabla 2: Ejemplo de estadística del registro 45
***Tabla 3:** Matrices de rotación y translación, de los planos clasificados*..... 127
Tabla 4: Información almacenada, destacando los valores escalares SF 137
Tabla 5: Comparación entre formatos de almacenamiento LAS versión 1.4 142
Tabla 6. Ejemplo aplicado de valores máximos y mínimos de cada campo en el archivo LAS original de Cerro Muriano 143
Tabla 7: Estándar clasificación LiDAR ASPRS, para los formatos 6-10 143

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

1.1 Introducción

> *"In light of the current digital revolution. How does one create an architecture that engages participants simultaneously in the world of the real and the virtual?"*
> (TSCHUMI 2004)

Podemos afirmar que la base y la garantía de una buena protección del patrimonio es el conocimiento adecuado del mismo. Este se desarrolla a partir de estudios realizados por diferentes especialistas, que utilizan como base para su trabajo y como medio de comunicación los levantamientos arquitectónicos.

Estos levantamientos se realizan a diferentes escalas, abarcando problemas diferenciados, como por ejemplo el estudio de la consolidación de pinturas o el análisis de las estructuras, en un mismo edificio patrimonial.

Esto conlleva a duplicar las actividades de registro, como primera etapa en la exploración de los bienes patrimoniales, en la mayoría de los casos con informaciones difíciles de superponer o relacionar y dificulta una lectura transversal de este conocimiento, con registros o documentaciones que no siguen estándares que permitan su integración, ni una adecuada gestión de la información, que permita una explotación continua, desde los diferentes frentes sobre los cuales se trabajan en el patrimonio.

Por ello de la importancia de desarrollar metodologías que permitan unificar criterios entre disciplinas y faciliten la aproximación de las diferentes visiones sobre el patrimonio en un mismo material de partida, tanto por su responsabilidad ética en el proceso de conservación, como en el avance del conocimiento del bien con la ayuda de herramientas con beneficios inmediatos en la gestión, en la planificación de los proyectos, el control del estado actual, la comunicación interdisciplinar y la evaluación de los resultados.

En esta tesis profundizamos estos desarrollos desde la tecnología de Escáner Láser Terrestre, ya que permite el registro de bienes complejos, a diferentes niveles de aproximación, en breves periodos de tiempo, sin comprometer la precisión y con una evolución que se complementa con otras tecnologías, con técnicas transferibles, y que plantean nuevos retos al realizar levantamientos a partir de modelos de nubes de puntos, como los levantamientos de escáner Láser aéreos LiDAR, o levantamientos SFM (*Structural From Motion*, procesos de escaneado y modelado a partir de fotos), entre otros.

Estas tecnologías nos permiten estudiar los levantamientos desde diferentes ángulos, así como analizar científicamente las propiedades de los edificios desde el inicio en la documentación del levantamiento, incluyendo nuevos enfoques como la inspección geométrica de las superficies, un aspecto ampliamente analizado en esta tesis. Estos análisis abren puertas en distintos campos de investigación, que buscan no solo la conservación del edificio, con los elementos que lo componen, sino también ampliar el conocimiento del mismo, la comunicación en todos los ámbitos que definen la obra arquitectónica y generar nuevos registros. Para que sean preservados y que estén disponibles a otras personas.

Es una tarea compleja proponer una metodología única, por la variedad de métodos de trabajo entre disciplinas, las características técnicas de los instrumentos y la complejidad de los objetos escaneados. Por lo cual se plantea una estrategia de consolidación de la información de partida, que pueda ser trabajada desde diferentes enfoques desde el punto de vista científico y practico.

Para el desarrollo de las metodologías planteadas, partimos del concepto de levantamiento arquitectónico (entendido como análisis, selección y síntesis del hecho real). Analizando el elemento patrimonial desde el proceso de toma de datos hasta la clasificación de los elementos que lo componen, y manteniendo la relación de las partes en base a objetivos predefinidos. La selección y organización de esta información se realiza al pasar los datos de 3D a 2D (2.5D), logrando una síntesis que permite diferentes niveles de aproximación al procesar las imágenes corregistradas, en las cuales se logra una representación patrimonial coherente que mantiene la relación con la de nubes de puntos en 3D, la cual se reordena mediante las capas de la clasificación, las cuales facilitan la manipulación y comprensión de las nubes de puntos.

Para manipular estas imágenes ráster con métrica hacemos referencia a técnicas de procesamiento de imágenes, identificando las que son transferibles a la tecnología de escáneres láser, al igual que la aplicación métodos de líneas paralelas a las arquitectónicas, las cuales utilizan la tecnología TLS, como las forestales, las superficies naturales, o de ingeniería inversa.

1.2 Motivación de la investigación

La principal motivación de esta tesis es la búsqueda de un vínculo entre las personas involucradas en la conservación del patrimonio, a partir de herramientas y métodos, en torno a una documentación rigurosa y a técnicas de análisis de los datos del levantamiento, que permitan una mayor compresión de elementos de carácter patrimonial.

Para este enfoque se realiza una manipulación de diferentes informaciones, tanto desde un punto de vista científico con el análisis riguroso de los datos, como del uso directo de las imágenes generadas en programas convencionales de tratamiento de imágenes, ello quiere decir que existirá un uso continuo en cuanto a aprovechamiento del registro, sin perder la valides de la información de partida y al mismo tiempo se tienen en cuenta los usuarios finales de los levantamientos, caracterizada en administraciones, académicos, profesionales en formación, empresas y público en general así como a los especialistas técnicos y científicos, en el campo del patrimonio.

Este es el punto de partida para crear nuevas herramientas en el análisis, la selección y la síntesis de problemáticas específicas, en el proceso de evaluación, de toma de decisiones, de documentación, o la simple difusión de características concretas del patrimonio.

El interés de crear herramientas en estos ámbitos nace principalmente de la tesis de máster llamada “Extracción y estructuración de la información proveniente de la tecnología de Escáner Láser Terrestre, Comparación de procesos de reducción poligonal relacionados con los mapas de desplazamiento.” (CORSO 2009). Esta tesis buscó pasar de modelos de mallas libres de alta resolución de modelos complejos, a mallas de baja resolución, extrayendo el detalle como mapas de desplazamiento en 2.5D. Con el objetivo de obtener modelos fáciles de manipular provenientes de

datos TLS, sin perder el detalle de las superficies, manteniendo la interacción de las imágenes con los modelos 3D decimados. Los modelos de baja resolución se desarrollaron siguiendo cuatro líneas de construcción de modelos, la decimación, reconocimiento de superficies en base a los contornos, detección de planos, y los modelos a partir de procesos de retopología, identificando cómo trabaja cada uno de estos modelos con los mapas de desplazamientos, cómo esta información se fusiona para volver a obtener un modelo de alta resolución, midiendo los límites en los cuales se pierden datos, por el cambio entre estos modelos.

Aunque esta tesis se abordó únicamente desde un punto de vista técnico, se estableció una base de partida coherente para el entendimiento de factores que influyen en el estudio de objetos y la vinculación de diferentes bases de datos sobre un mismo modelo en 3D. Este interés continúa en la tesis doctoral en cuanto al aprovechamiento del levantamiento y su relación con los casos de estudio, ampliando y registrando rigurosamente la información del patrimonio, tanto en 3D, como en la extracción de información en 2D y 2.5D.

Esta motivación nace al mismo tiempo de la experiencia obtenida en el *Laboratori de Modelització Virtual de la Ciutat* (LMVC)[1], participando en proyectos desde el 2006. En los cuales se han desarrollado más de 45 proyectos de escala arquitectónica, 15 proyectos de escala arqueológica, 16 proyectos a escala urbana. Destacan los proyectos desarrollados para el Museu d'Història de Barcelona (MUHBA), como lo son el Park Güell, el Temple d'August, Saló del Tinell, sala de calderas de Fabra i Coats; proyectos de restauración de edificios patrimoniales, como Porta de la Pau de Barcelona; el Museu Marítim de Barcelona; edificios del Hospital de Sant Pau; los Planes Especiales de Catalogación de núcleos históricos de Lloret de Mar, Sitges, Castellfollit de la Roca, Sant Pere Mallorca, Santa Bàrbara Alacant, Vila Vella en Tossa De Mar, el Malecón en Cuba, y el casco histórico de Cadaqués.

La experiencia del LMVC también ha sido capital para participar en 3 proyectos competitivos del MICINN: Resilencia, Accesibilidad Y Sostenibilidad Para La Ciudad Histórica, (REACT), Plan AVANZA I+D en cooperación: Inteligencia ambienTal para ACcesibilidad al pAtrimonio (ITACA) y Patrimonio Accesible: I+D+i para una cultura sin barreras (PATRAC).

Paralelo a la experiencia en la tecnología de TLS, el LMVC aborda dos líneas de investigación y desarrollo, por una parte la **Teledetección (RS)[2]** para el análisis de los recursos naturales, el uso del suelo y el consumo. Y los **Sistemas de Información Geográfica (GIS)[3]** para entender las relaciones de la ciudad, contribuyendo a la gestión y toma de decisiones dirigidas a un entorno urbano más habitable.

[1] El Laboratorio Virtual de la Ciudad (LMVC) de la *Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech* (UPC) fue creado en 2000 como una iniciativa del Centro de Política de Suelo y Valoraciones (CPSV), junto con la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona (ETSAB), impulsado por los departamentos de Construcciones Arquitectónicas I (CA1) y de Expresión Gráfica en la Arquitectura (EGA1). Actualmente el LMVC lleva más de diez años en la investigación y desarrollo de usos y aplicaciones de la tecnología láser en el registro del Patrimonio Arquitectónico. Su objetivo principal es ofrecer una integración de las nuevas tecnologías en el estudio, visualización y modelado de la ciudad.
www.cpsv.upc.es/LMVC

[2] La teledetección o detección remota, entendida como la adquisición de información a pequeña o gran escala de un objeto o fenómeno, ya sea usando instrumentos de grabación o instrumentos de escaneo en tiempo real, con el uso de tecnologías de sensores para la adquisición de imágenes. El LMVC se ha enfocado especialmente en técnicas pasivas.

[3] Los sistemas GIS puede definirse como un modelo de una parte de la realidad referido a un sistema de coordenadas terrestre y construido para resolver problemas complejos de planificación y gestión geográfica.

Todo lo anterior se mezcla en cierta medida en el desarrollo de la tesis doctoral, integrando las tecnologías con el fin específico de proponer una metodología que parta del entendimiento de la tecnología TLS, el análisis de esta base de datos a través de técnicas de clasificación, en relación a objetivos planteados en cada caso de estudio y conocimiento del objeto arquitectónico. Esta información se sintetiza en mapas en 2D y 2.5D, que permitan relacionar bases de datos de forma metódica y con cierto nivel de estandarización, al igual que analizar factores específicos, como la continuidad de los análisis en el tiempo.

1.3 Problemática y objetivos

La complejidad de los bienes patrimoniales requiere la intervención de diferentes disciplinas. Cada una de estas realiza tareas de documentación específicas, que no tienden a complementarse con otros registros, esto conlleva a duplicar las actividades de registro, a diferentes escalas y niveles de detalle. Que van desde la consolidación de los materiales, hasta el análisis de movimientos que afectan la estructura, cada uno, con bases de datos que tienden a no relacionarse.

Aunque es necesario que cada caso se estudie desde un punto de vista específico, las bases de datos generadas deben poder relacionarse, para facilitar y aclarar los desarrollos obtenidos. Evitando con ello plantear resultados que se contradigan, o que se basen en documentaciones que no correspondan con la precisión métrica esperada para su fin, teniendo una metodología clara, ya que de lo contrario hay una repercusión directa en los costes de ejecución, de toma de decisiones, que en último lugar afecta al bien, en una pérdida de valor del elemento patrimonial por falta de control de su deterioro y difusión.

Esta problemática se profundiza en relación al tipo de levantamiento que realiza cada disciplina, se considera que la documentación arquitectónico puede ser instrumental, mientras que el registro del revestimiento del material, las tipologías de degradado y los procesos de estratificación arqueológica son técnicas manuales visuales "*naked eye*", utilizando para ello técnicas de Fotogrametría, o incluso fotografías en perspectiva.

Aunque una fotografía en perspectiva no es suficiente para documentar un bien patrimonial, hay que reconocer que la inclusión de la fotografía en el patrimonio ha permitido relacionar la información, con otros estudios desarrollados para el mismo fin, este tipo de representación ayuda a relacionar los datos para facilitar la posterior fase de interpretación de los mismos, incluso integrarlos a posteriori a una base planimetría que permita su superposición con otras bases de datos. Diversos autores plantean que estos permiten volcar en el mismo soporte gráfico-fotográfico una gran cantidad de datos relacionados con diferentes niveles de observación, desde los más generales que atañen a las grandes masas de muros, hasta los referidos a las unidades estratigráficas, añadiendo además la información relativa a las relaciones, los materiales y técnicas constructivas y los tipos de superficies (MILETO y VEGAS 2011), como se ejemplifica en la Ilustración 1.

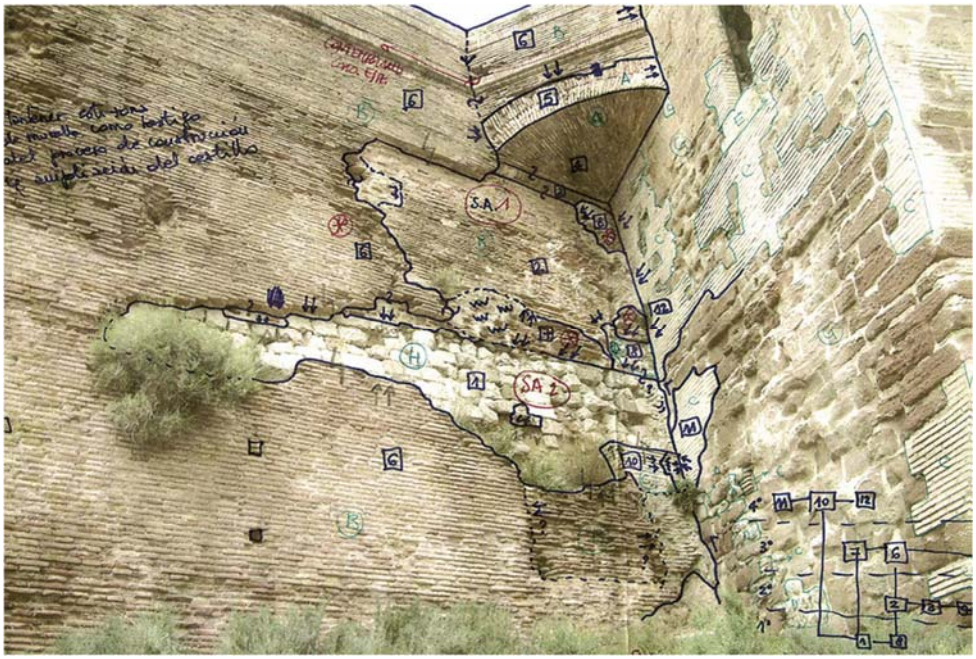
En otras palabras estos datos visuales permiten la descripción cualitativa en conjunto de cierto contenido, pasando por alto la relevancia de la precisión métrica, la planimetría rigurosa de las zonas catalogadas y la descripción en detalle de elementos comparativos entre sí, o el mismo elemento en el transcurso de un tiempo o en el trascurso de algún evento predeterminado, como lo puede ser un proceso de limpieza. Aunque las bases fotográficas han mejorado la documentación, no permite la continua exploración de la información, por los problemas descritos anteriormente, lo cual limita desde el punto de vista científico el trasmitir ciertas características del edificio y la prospección futura

de un mismo estudio, al requerir reconstruir en su totalidad las información de partida, sobre todo al no incluir una precisión métrica rigurosa.

En la actualidad estos procesos están siendo modificados por las nuevas tecnologías, nos permiten unir múltiples capas de información en un modelo, como lo pueden ser el color, procesos de iluminación, análisis de la superficie como por ejemplo la curvatura, profundizar en las características geométricas no solo del elemento sino de su superficie, llegando a manipular la información de los materiales de forma, desde el levantamiento TLS, como por ejemplo con la pérdida o alteración material de un objeto en el tiempo(SIMON 2010).

Esto abre las puertas a nuevos campos de investigación, que buscan tanto la conservación del edificio con los elementos que lo componen, como la difusión de su valor, en ámbitos tanto técnicos como de interés público.

Ilustración 1: Croquis de campo, levantamiento estratigráfico, Castillo de Monzón, Huesca



Fuente: (MILETO y VEGAS 2011)

Desde esta línea, proponer una metodología única es una tarea compleja, dada las características técnicas de los instrumentos y la complejidad de los objetos - escenarios escaneados, pero se pueden establecer criterios que sigan ciertos estándares internacionales y nacionales en la búsqueda de desarrollar nuevas propuestas metodológicas que se aproximen a tal fin, ejemplo de estos estándares de partida desde el punto de vista de la documentación digital del patrimonio en diversas organizaciones son: (EPOCH, D4.2.1.: Report on Standards". Excellence in Processing Open Cultural Heritage 2002), (EPOCH, A Survey of Documentation Standards in the Archaeological 2006), (W3C, The World Wide Web Consortium 2015), (W3D, Web 3D Consortium 1997), (W3C, The World Wide Web Consortium 2015), (W3D, Web 3D Consortium 1997), (BRYAN y BLAKE, Metric Survey Specifications for Cultural Heritage 2009) (BRYAN, An addendum to the metric survey specifications for English Heritage 2006).

Hipótesis:

Se plantea que la creación y explotación de bases de datos en dos dimensiones permite profundizar el conocimiento de los edificios patrimoniales desde la tecnología TLS. Utilizando para el análisis y selección, técnicas de clasificación en 3D, conversión de datos de 3D a ráster a escala en 2D (2.5D) y como síntesis el procesamiento de imágenes, en busca de una representación útil para las diferentes disciplinas. Esta información se concibe como mapas temáticos con una relación directa al modelo en 3D, de las características del contexto en el que se ubica el bien patrimonial y de la problemática específica sobre la cual se profundiza en cada caso de estudio.

Objetivo general:

Identificar el potencial de las bases de datos TLS como imágenes a escala, como una base que permite el extenso conocimiento del patrimonio arquitectónico, a partir de la clasificación y conversión de datos 3D a 2D - 2.5D provenientes de la tecnología de Escáner Láser Terrestre, en su análisis, selección y síntesis.

Objetivos específicos:

- Establecer los conceptos de levantamiento arquitectónico que permitan un mayor entendimiento de cómo realizar una clasificación TLS, en relación a valores patrimoniales.
- Identificar el aporte de la clasificación de nubes de puntos al conocimiento del patrimonio, en relación a la estructurar la información Urbana y Arquitectónica, su explotación y análisis como imágenes TLS.
- Plantear una metodología de conversión de bases de datos 3D a 2D-2.5D, en la que se aumente y homogenice la información TLS.
- Realizar una breve descripción de los conceptos de representación en arquitectura y arqueología, en relación a la representación de las bases de datos planteadas.
- Enunciar las técnicas de procesamiento de imágenes LiDAR utilizadas, para la explotación de los datos, identificando el potencial de la conversión y optimización de las bases de datos.
- Valorar las oportunidades que genera la metodología planteada en dos dimensiones, complementada con técnicas homólogas en un estudio tridimensional. Y su ejemplificación con dos casos de estudios, de fisuras – deformaciones de fachada y de análisis del deterioro de fachadas de piedra.
- Valorar el aporte de las bases de datos en 3D, 2D y 2.5D, por medio de entrevistas a profesionales expertos en la representación, protección y difusión del patrimonio.

1.4 Estructura del trabajo

La tesis parte del concepto levantamiento arquitectónico, como una aproximación a la arquitectura en la que analizan, se seleccionan y se sintetizan algunos de sus episodios en relación con las intenciones o fines propuestos. El análisis parte del estado del arte de la tecnología (capítulo 1), las metodologías relacionadas al patrimonio (capítulo 2) y con la clasificación en 3D (capítulo 3). A continuación (capítulo 4) se plantean métodos de selección y reorganización de la información, para

su explotación como imágenes a escala, sintetizando esta información mediante operaciones gráficas, que pretenden acercar la tecnología al entendimiento de especialistas interesados en la conservación de bienes patrimoniales.

En el capítulo cinco se aplican los desarrollos propuestos en dos casos de estudio, uno en relación a patologías edificatorias, en un edificio de carácter industrial, y el otro a la exploración de características geométricas de una fachada patrimonial, la cual presenta diversas patologías de la piedra y un grado de detalle documentado rigurosamente. Realizando de forma paralela una serie de entrevistas, que validan los resultados obtenidos, estos resumen las metodologías planteadas y al mismo tiempo introduce nuevos retos. A continuación se detalla de forma específica cada capítulo:

Capítulo 1. Introducción: Se identifica la complejidad de los datos TLS y la necesidad de un vínculo entre las personas involucradas en el proceso de conservación del patrimonio arquitectónico, a modo de introducción a la tesis.

Capítulo 2. Estado del arte TLS: El segundo capítulo plantea los fundamentos de la tecnología que son aplicable a la investigación, describiendo los sistemas de captura activos, las limitantes que presentan, un resumen de las metodologías utilizadas para levantamientos, cada una de estas ejemplificadas con casos de estudio próximos a los que se desarrollaran en la tesis y se concluye con un resumen de los avances y experiencias obtenida en la unión entre posiciones TLS y el manejo de información complementaria, como el color e intensidad.

Capítulo 3. Clasificación: Se realiza un repaso a los conceptos de clasificación y análisis en arquitectura, entendiendo que estos procesos no son la descomposición de la arquitectura en elementos, sino el análisis de las partes que componen un todo, ya que la arquitectura no se puede explicar por la suma de sus partes de forma independiente. Paralelo a ello se desarrolla el estado del arte de los procesos de clasificación de la tecnología TLS, enfatizando en dos procesos, el RANSAC para la detección de planos múltiples (SCHNABEL, WAHL y KLEIN 2007) y la clasificación de superficies naturales (BRODU y LAGUE 2012), aplicando esta técnica de descomposición de superficies orgánicas a la clasificación de elementos arquitectónicos; por último, se aplica estos desarrollos a dos casos de estudio, las calderas de Fabra i Coats y el casco urbano de Villa Vela, en Tossa de Mar, integrando el desarrollo tecnológico con un enfoque arquitectónico.

Capítulo 4. Conversión 3D a 2D y 2.5D: Parte de la comprensión de las propiedades gráficas de los levantamientos arquitectónicos, para ser aplicadas a diferentes bases de datos, en relación a sus características, tanto de fachada, suelo, cubiertas, como de la vegetación y mobiliario. Una vez generadas estas bases se definen los formatos y se reestructura la información, permitiendo su explotación utilizando formatos como el LAS *datasets. S*e proponen metodologías en modelos automatizados, para su optimización, en relación a la resolución, oclusiones y ruido.

Capítulo 5. Casos de estudio: Se plantean dos casos trasversales, que abarcan los desarrollos obtenidos a lo largo de los capítulos de la tesis, planteando una metodología integral, que permita encontrar las limitantes y avances de la tesis, buscando entender qué valor agrega analizar la información en dos dimensiones frente al modelo en tres dimensiones, y su aplicación en futuros proyectos. Paralelo a estos, se realizan entrevistas a diversos profesionales, con diversas especializaciones, para comprender las diversas necesidades que existen y las dificultades en el acceso a la información, lo cual se tiene en cuenta en los ejercicios desarrollados, hasta tal punto que se ejemplifican líneas de desarrollo futuras, como lo son la vectorización automática de los

planos extraídos. De forma paralela se realizaron entrevistas a diferentes profesionales del campo del patrimonio y expresión gráfica en arquitectura, que permitieron validar y corregir las metodologías aplicadas.

Capítulo 6. Conclusiones. Busca recopilar los desarrollos y conclusiones obtenidas a lo largo de la tesis, relacionándolas en torno al concepto de levantamiento, como estructura que ha articulado la tesis. La tesis no logra abarcar en su totalidad todos los temas sobre los cuales existe un potencial por desarrollar, por lo cual se incorpora unas recomendaciones de trabajos futuros, destacando la necesidad del trabajo con otras disciplinas complementarias a la arquitectónica, relacionadas con el patrimonio, en el desarrollo de casos de estudio específicos con las técnicas y metodologías expuestas.

Capítulo 2. PRINCIPIOS DEL ESCÁNER LÁSER

La luz se ha utilizado de forma continua para medir objetos, tanto desde el campo de visión por computación, como en los campos en los que se desarrollan sensores. Estas técnicas de medición se pueden dividir en dos categorías, activas y pasivas.

Las técnicas pasivas no emiten radiación alguna, se basan en la detección de la radiación ambiental reflejada, siendo común utilizar la luz visible o el infrarrojo. Los métodos pasivos dependen de encontrar correspondencia entre imágenes en dos dimensiones, con límites en los procesos y en la precisión, en relación a los patrones identificables en los elementos escaneados, puesto que la precisión de estos métodos depende mayoritariamente de la resolución de las imágenes y de la densidad de elementos identificables en ellas.

Las técnicas activas emiten alguna clase de señal[4] y analizan su retorno para capturar la geometría de un objeto o escena. Los sistemas activos no requieren luz ambiental, porque generan su propia luz, proporcionan una gran cantidad de mediciones de manera automática, también se caracterizan porque se pueden utilizar en superficies sin rasgos distintivos, y la captura de datos se produce casi en tiempo real.

En esta tesis se profundizan los sistemas activos, basados en la utilización de la tecnología de Escáneres Láser Terrestre.

2.1 Conservación del patrimonio arquitectónico

En la tesis de (VALLE MELÓN Lectura 2007, publicación 2011) se explora en profundidad la evolución del concepto de patrimonio, definiendo el patrimonio como: *"el patrimonio está constituido por todo aquello que se considera valioso y es* ***transmitido de unas generaciones a otras****, cuyo* ***valor es asignado socialmente*** *por diversos motivos y circunstancias, pudiendo cambiar esta valoración en función de la coyuntura".* En esta tesis también se aclara los tipos de patrimonio que precisan de la medida y la representación gráfica para su documentación y registro. Clasifica los conceptos de patrimonio en dos líneas, la natural y la cultural, que al mismo tiempo están relacionada con el concepto de patrimonio integral. El patrimonio natural se dividen en: paisajístico, paleontológico, genético, forestal, botánico, zoológico y ecológico. El patrimonio cultural también se subdivide en dos ramas, la material y la inmaterial, en la material encontramos los siguientes tipos de patrimonio: artístico, histórico, arqueológico, arquitectónico, bibliográfico y documental, y como patrimonio inmaterial encontramos: Folclórico, tradiciones orales, saber hacer, entre otros.

En los documentos de la (UNESCO 2003), el patrimonio se define como nuestra herencia del pasado, nuestros bienes actuales y lo que legamos a las generaciones futuras. Este interés por la preservación ha crecido hasta plantearse el concepto de patrimonio digital, la UNESCO considera que gran parte de la información del mundo es de origen digital, como un tesoro de todas las actividades humanas, por ello plantea directrices que busca la preservación de esta información.

Todo ello plantea un abanico de preguntas en cuanto a la conservación del patrimonio, que nacen de la pregunta de cómo preservar esta herencia. Nos preguntamos:

[4] Radiaciones electromagnéticas (desde ondas de radio hasta rayos X) o ultrasonidos

¿Qué importancia tiene medir el patrimonio?, ¿cómo debe medirse?,¿Quién debe medirlo?, ¿de quién es la responsabilidad?, ¿en dónde la información patrimonial encaja en los procesos de conservación?, ¿Cuál es el primer paso en la planeación?, ¿qué debe contener el registro?, ¿con qué precisión?, ¿qué nivel de detalle es necesario?,¿qué hacer con la medida?, ¿qué nivel de compromiso es necesario en la toma de decisiones?, ¿Quién debe tener acceso a la información patrimonial?, ¿qué enfoque, nivel y método debe aplicarse?, ¿qué registro debe ser almacenado e identificado?, ¿qué aporte científico nace de la digitalización de la realidad?, ¿qué aporta su digitalización?, ¿cómo proteger esta información del paso del tiempo?, ¿Cómo hacer accesibles esta información y los resultados de investigaciones?, ¿qué obligaciones legales tiene la preservación del patrimonio digital?, etc.

Todas estas preguntas se deben tener en cuenta en cada proyecto patrimonial, desde el proceso de documentación, toma de decisiones y actuación directa, estableciendo estructuras y metodologías que se desarrollan alrededor de cada caso de estudio, ya que cada caso es único, con valor singular.

2.2 Antecedentes de imágenes TLS en la conservación de edificios patrimoniales

En los últimos años se ha desarrollado una tendencia hacia el análisis científico de la información TLS, utilizando técnicas de procesamiento de imagen en el análisis ráster, en algunos casos combinando diferentes bases de datos, como lo puede ser imágenes multiespectrales, imágenes térmicas, bases de datos GIS, entre otras. Siendo recurrente la búsqueda de patologías o materiales concretos. Como por ejemplo la pérdida o alteración material de un objeto en el tiempo (J. LERMA 2008).

Esto abre puertas a campos de investigación, que buscan no solo la conservación del edificio, con los elementos que lo componen, sino la documentación de su estado actual con su respectiva evolución y su difusión respectiva, en ámbitos tanto técnicos como públicos, de aspectos fundamentales que definen la obra arquitectónica.

Entre estas líneas de investigación se enfatizan los aportes que generan metodologías estandarizadas, en el proceso de medición y comparación de un elemento en el tiempo, especialmente las relacionadas a la perdida de volumen, aunque principalmente en 3D, se ven algunos casos que contemplan el análisis de modelos digitales de superficies en 2.5D, en los que se logra identificar de forma rigurosa cuando intervenir en un caso de estudio concreto, al permitir cuantificar la perdida de material, permitiendo cuantificar las zonas afectadas, mediante procesos cuantitativos de medición.

Se ha realizado una exhaustiva revisión bibliográfica de artículos, libros y proyectos relacionados con el análisis de información TLS desde el procesamiento de imágenes, lo que ha permitido partir de una visión global de la situación de las cuestiones planteadas.

2.2.1 Inspección geométrica TLS, información XYZ.

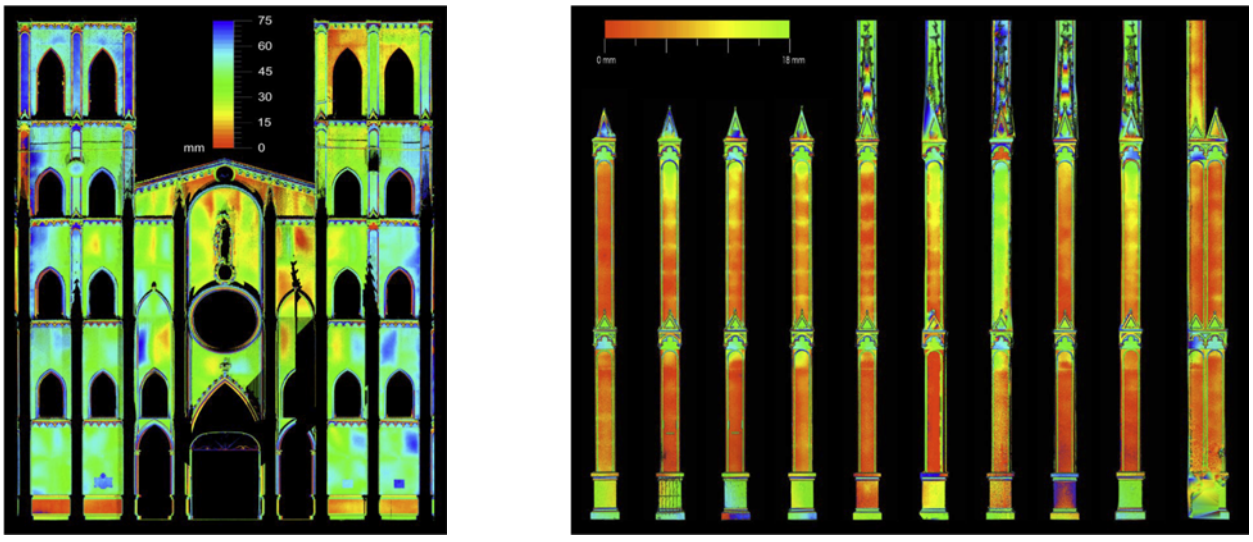
Diversos estudios plantean el análisis de deformaciones en edificios con la tecnología TLS (CEREZUELA 2013), (LINDSTAEDT, MECHELKE, y otros 2011), (BOEHLER y A., 3D scanning and

photogrammetry for heritage recording: a comparison, 2004), Ilustración 2. En ellos se plantea que con la información TLS se pueden identificar rápidamente áreas problemáticas por deformaciones de los edificios, problemas estructurales (OLSEN 2010) o la geometría de elementos arqueológicos. En unos casos ha ayudado a los ingenieros de estructurales a confirmar sus análisis en relación al comportamiento de los edificios, en otros casos la identificación de deformaciones solo abarca problemas estéticos, que no identifican afectaciones de la integridad del edificio. En el campo de la arqueología estas deformaciones se analizan para tareas de restauración y reconstrucción virtuales.

En los trabajos desarrollados por (BONALI, y otros 2013), (A. C. PESCI 2011), (A. T. PESCI 2011), se propone una aproximación basada en mapas morfológicos basados en TLS para el análisis de los datos, computarizado las diferencias comparando puntos a primitivas, esto permite la creación de mapas de deformaciones y su evolución en el tiempo. En la Ilustración 3 se ve un ejemplo de estos mapas temáticos, con una distancia entre puntos de 5mm a 1cm aproximadamente, como representaciones directas de la nube de puntos y su comparación con un plano de referencia.

El deterioro de las fachadas de los edificios se suele evaluar mediante inspecciones visuales y pruebas destructivas y no destructivas. Las inspecciones manuales son costosas, producen un gran número de datos superpuestos y requieren de un tiempo elevado para su estudio. Se plantea en las ponencias de (HEMMLEB, y otros 2006), (LINDSTAEDT, Virtual reconstruction of the almaqah temple of yeha in ethiopia by terrestrial laser scanning, 2011) y (AL-NESHAWY, y otros 2009) que un estudio a partir de datos TLS, es más rápido y ofrece una alternativa a los métodos tradicionales, desde el punto de vista de análisis geométricos, de deformaciones y abombamientos.

Ilustración 2: Estudio de mapeo de una superficie de fachada interior, 32 colores

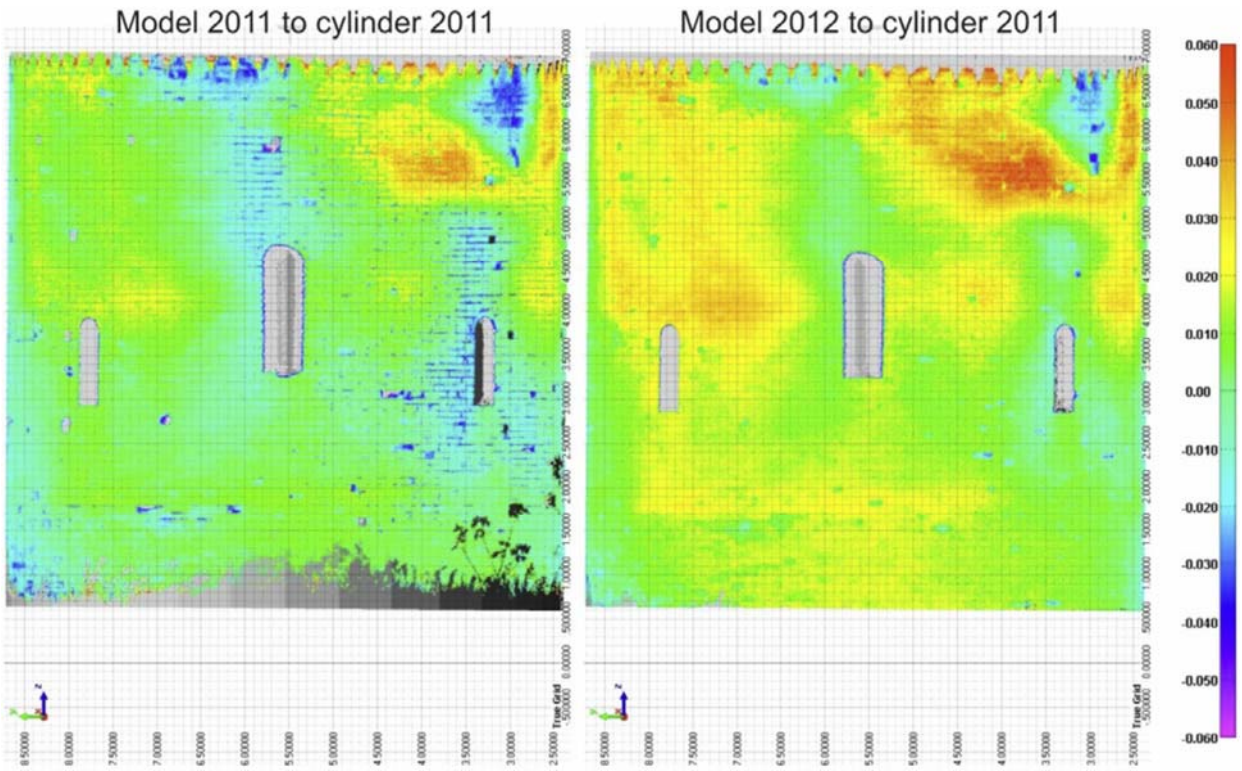


Fuente: (CEREZUELA 2013)

El caso de estudio presentado por (AL-NESHAWY, y otros 2009) plantea el encontrar la curvatura de segundo orden de paneles de mármol de una fachada para medir su abombamiento, con un FARO LS 880HE80, repitiendo el mismo proceso de forma manual con un *bow–meter*, la Ilustración 4 muestra un ejemplo de los resultados del calculó mediante el ajuste de una curva de segundo orden a los datos de la nube de puntos, en relación a la línea del centro del panel tanto en la vertical y la

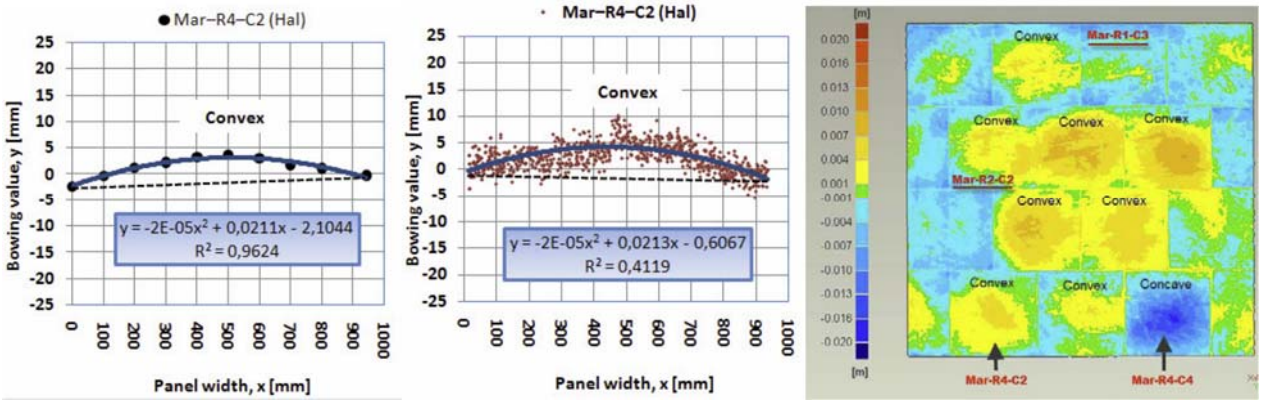
dirección horizontal. Complementario a ello se plantea un proceso similar para encontrar el deterioro por delaminación de un fachada de ladrillos.

Ilustración 3: Morfología del ábside comparado a un plano, datos del 2001 y 2012 después de un terremoto de Emilia (valores en metros)



Fuente: (BONALI, y otros 2013)

Ilustración 4: Abombamiento horizontal de una pieza de mármol de forma manual y TLS, derecha temático TLS

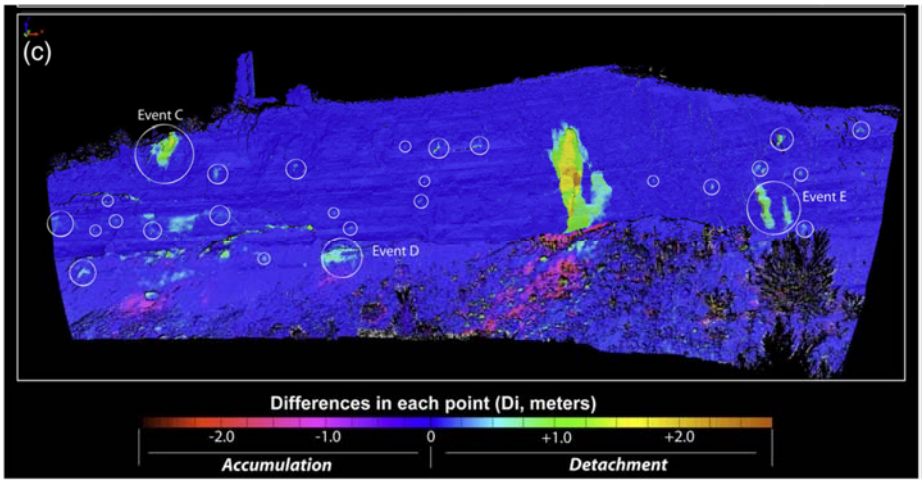


Fuente: *(AL-NESHAWY, y otros 2009)*

El escaneo láser se utiliza con frecuencia en estudios naturales, para lograr una mayor precisión y compresión integral de la topografía de entornos naturales, como se ve en el catálogo de la Ilustración 5. Tras una extensa documentación de estos entornos, se han abierto una amplia gama de

aplicaciones científicas para el TLS, esto incluye el análisis detallado de las propiedades geométricas de las superficies naturales, en una amplia gama de escalas, (desde pocos centímetros a kilómetros).

Ilustración 5: Ejemplo de catalogación de eventos de caídas de rocas



Fuente: (ABE10)

A continuación se exponen algunos casos de estudio de las principales líneas relacionadas a estudios naturales LiDAR:

- Estratigrafía en 3D y el análisis del afloramiento (LABOURDETTE y JONES 2007) (RENARD 2006)
- Distribución de tamaños de grano en los ríos (HODGE, BRASINGTON y RICHARDS 2009), (HERITAGE y MILAN 2009)
- Campos de dunas (NIELD, WIGGS y SQUIRRELL 2011), (NAGIHARA 2004)
- Temas de hidráulica relacionados con la rugosidad de la vegetación (ANTONARAKIS, RICHARDS y BRASINGTON, Object-based land cover classification using airborne LiDAR 2008), (ANTONARAKIS, RICHARDS, y otros, Leafless roughness of complex tree morphology using terrestrial LiDAR 2009) (ANTONARAKIS, RICHARDS, y otros, Determining leaf area index and leafy tree roughness using terrestrial laser scanning 2010)
- La dinámica del lecho de los canales (MILAN, HERITAGE y HETHERINGTON, Application of a 3D laser scanner in the assessment of erosion and deposition volumes and channel change in a proglacial river 2007), (MILAN, HERITAGE y LARGE, y otros 2010)
- La supervisión in situ de la erosión de los acantilados y las características de caída de rocas (ABELLÁN, y otros 2010), (LIM y SUTER 2009) (RABATEL, y otros 2008), (ROSSER, PETLEY, y otros 2005), (ROSSER, LIM y PETLEY, Patterns of precursory rockfall prior to slope failure 2007), (TEZA, y otros 2008) y (JASZCZAK 2006) entre otros.

2.2.2 Documentación de daños en las superficies de los edificios, información color e intensidad.

Los edificios históricos en zonas urbanas muestran una aceleración en su deterioro. Hay diferentes tipos de daños que afectan a los materiales de los monumentos históricos, como la humedad, la sal

floración, los cambios biológicos como musgos y líquenes, entre otros. La detección de la degradación del material en edificios históricos con métodos tradicionales como el mapeo manual, o el análisis a simple vista por parte de un experto, se consideran procedimientos laboriosos y requieren mucho tiempo.

Existe un interés creciente por utilizar el procesamiento de imágenes digitales, tales como los métodos de clasificación de imágenes, con el fin de mejorar el proceso de generación de mapas temáticos para el estudio y el diagnóstico de los daños en los materiales (J. LERMA 2001), (J. LERMA 2000), (STRACKENBROCK, SACHER y GRUNICKE 1990), (M. W. HEMMLEB 2005), (HEMMLEB, y otros 2006), entre otros. En estas investigaciones se utilizan métodos de clasificación espectrales, que se basan en el hecho de que los materiales tienen características de reflexión específicas, dependientes de longitud de onda. Las técnicas de clasificación reducen el rango de valores de la imagen (número digital) a otro nivel (clases) a través de un sistema de estadísticas de asignación. Hay diversos métodos de clasificación, que varían en complejidad. Estos métodos incluyen clasificadores duros y blandos, pueden ser métodos paramétricos y no paramétricos, como también ser técnicas supervisadas y no supervisadas.

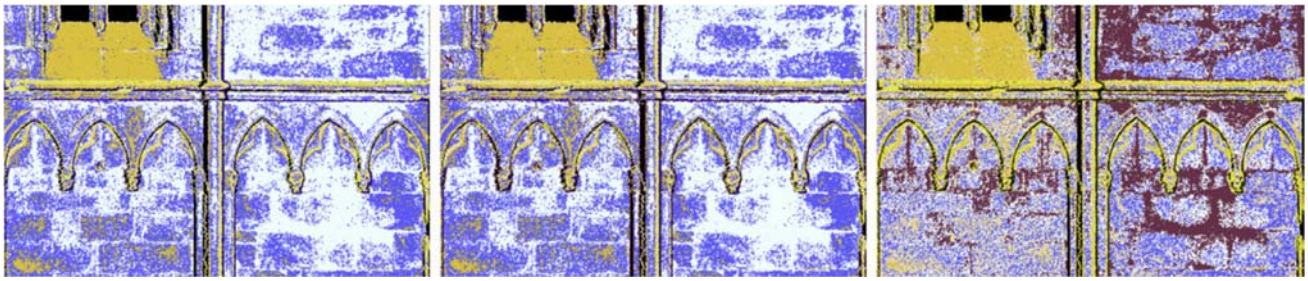
En publicaciones de (GONZÁLEZ, y otros 2012), (CRESPO 2010) y (ARMESTO, y otros 2010) se realizaron clasificaciones de imágenes LiDAR a partir de la información de intensidad, utilizando como base las imágenes en dos dimensiones de una posición TLS, exportando esta información desde los programas comerciales que acompaña cada instrumento. En la publicación de (ARMESTO, y otros 2010) se compara la información de intensidad de tres escáneres, FARO Focus^{3D}, TRIMBLE GX200 y el RIEGL-Z390i, a partir de la clasificación de la intensidad, con tres técnicas de clasificación, como se ve en la Ilustración 6. Este análisis permitió obtener conclusiones en relación a la detección y clasificación de patologías utilizando la información de intensidad, para cada escáner y con cada técnica de clasificación. En la publicación de (GONZÁLEZ, y otros 2012) se comparan los escáneres Riegl LMS Z-390i y Trimble GX200, en la búsqueda de presencia biológica en puentes, utilizando los métodos de clasificación Kmeans y fuzzy C-means.

Estas publicaciones coinciden en el análisis TLS por posición de escaneo, este proceso no se puede hacer extensivo en fachadas complejas que requieran más de una posición TLS, a causa del ruido por la precisión del modelo, por la falta de calibración de la información de intensidad y por el ruido producido al unir posiciones TLS sin una calibración adecuada en relación a como recoge la información cada escáner.

Otras publicaciones se basan en la evolución de patologías, en cambios volumétricos y en cambios del material. Estos métodos suponen la intervención de distintos profesionales con puntos de vista diferentes y con aplicaciones metodológicas diversas. También plantean una concepción global unitaria y convergente hacia ese objetivo común, de identificar los valores inherentes y buscar los medios para su preservación.

En estas áreas de estudio es de interés el reconocimiento de patrones en materiales. Desde el campo de la visión por ordenador y el reconocimiento de patrones se plantean diferentes aproximaciones para el desarrollo de procesos semiautomáticos que permitan el reconocimiento de la forma de los edificios, desde imágenes históricas de las fachadas, estos procesos usualmente se dividen en dos: elementos de fachada (puertas, ventanas, etc.) y fabrica (ladrillo, piedra, cornisas, etc.), (WILLIS 2010), (HENZE 2005).

Ilustración 6: Los resultados de una clasificación de intensidad TLS, de izquierda a derecha: *Isodata classification* (8 categorías); *k-means classification* (8 categorías); *Fuzzy k-means* (8 categorías). Escáner TRIMBLE GX200



Fuente: (ARMESTO, y otros 2010)

Desde otro punto de vista la información en 2D y 2.5D de alta resolución se profundiza ampliamente en análisis de pinturas, entendiendo que en algunos casos se encuentran integradas en los edificios patrimoniales. La imagen digital y la captura de datos de profundidad son fundamentales en el ámbito del Patrimonio Cultural (BARAZZETTI, y otros 2010). En el caso de la pintura, la digitalización de las imágenes multiespectrales y el registro en 3D con TLS se utilizan para (C. LAHANIER 2005):

- **Identificación de pigmentos**
- **La medición precisa del color**
- **La caracterización y renderizado**
- **Visualización detallada de los movimientos del pincel**
- **Medición de la forma del soporte (de madera)**
- **Rugosidad de la capa de pintura**

Los estudios de pinturas e identificación del material se basan en métodos no invasivos, como la fluorescencia de rayos X (XRF), el *láser - induced breakd own spectroscopy (*LIBS), la reflectancia y la espectroscopia *Raman*, imágenes multiespectrales, reflectografía visible, IR y UV inducir fluorescencia visible (PELAGOTTI, y otros 2008). Estos análisis explotan el hecho de que cada material refleja, absorbe y emite radiaciones electromagnéticas en función de su composición molecular y la forma. Gracias a la energía diferente, para cada longitud de onda que es posible deducir información específica acerca de la pintura. Fluorescencia de imágenes se destacan los barnices y las pinturas superpuestas. La reflectografía IR permite inspeccionar y revela los dibujos ocultos que ponen debajo de las capas de la primera pintura (por ejemplo, la visualización de los esquemas del artista). Los rayos X son capaces de ofrecer información acerca de las estructuras internas.

Todas estas técnicas de imagen examinan las pinturas como objetos en dos dimensiones ignorando la información de profundidad. La naturaleza plana de una pintura justifica este enfoque, sin embargo, en algunos casos, el pandeo del lienzo o bien del soporte y de la superficie es un factor significativo para conservadores. Por estas razones se introduce las técnicas de escáner láser, especialmente cuando se utiliza madera como apoyo de la pintura.

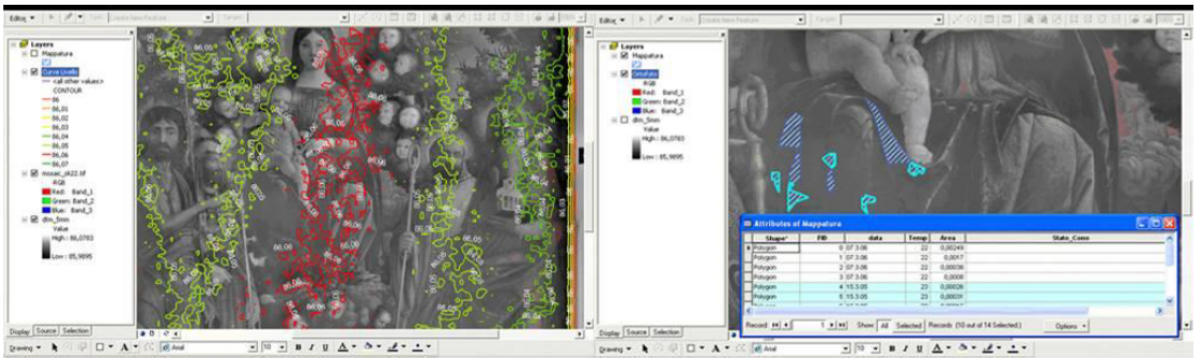
Esta exploración en dos dimensiones se ha llegado a manejar en programas SIG, como en la Ilustración 7, en la cual se comparan registros con escáner láser terrestre en diferentes años, Color

RGB (mosaico de 40 imágenes, genera una imagen de alta resolución de 0,2mm pixel), infrarrojo cercano, adquisiciones de fluorescencia.

De hecho los datos cuantitativos acerca de las deformaciones son particularmente relevantes, para una correcta evaluación del proceso de restauración que debe llevarse a cabo. Los datos 3D pueden proporcionar información crucial para la detección temprana de los movimientos, evitando daños irreversibles.

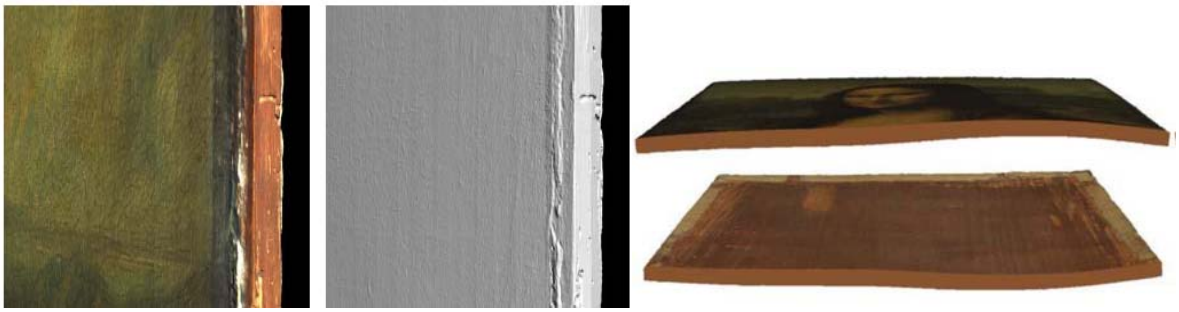
La Información 3D también se pueden integrar con los datos de 2D para crear un paquete completo de información acerca de una obra (R. FONTANA 2005), (BLAIS 2007). La precisión requerida por los restauradores para un modelado adecuado del proceso involucrado en el mantenimiento de la pintura de corto alcance es de 0.01 a 0.1 mm de precisión, la necesaria en los levantamientos de arquitectura es de 1-10 mm, como en el ejemplo de la Ilustración 8.

Ilustración 7: Ortoimagen de alta resolución de la "*Trivulzio Pala*" (1497) en Arcgis, ráster y vectorial, para estudiar datos de diferentes registros



Fuente: (BARAZZETTI, y otros 2010)

Ilustración 8: A) Detalle del escáner de alta resolución de la Mona Lisa, color y relieve, con la presencia de una púa, panel rasurado, y los detalles del patrón craquelado. B) Deformación del panel de álamo.



Fuente: (BLAIS 2007)

2.3 Estado del arte Tecnología de Escáner Láser

La captura y el modelado de la información en 3D del entorno construido es un gran reto, dada la variedad de técnicas, de tecnologías y de puntos de vista que ya están en uso. Estas buscan el equilibrio entre tiempos, costo y precisión (BOEHLER, HEINZ y MARBS, The Potential of Non-contact Close Range Laser Scanners for Cultural Heritage Recording 2001), para el registro de la realidad de forma coherente a las necesidades y restricciones de los proyectos. En este sentido se han desarrollado numerosas metodologías de construcción de modelos, la integración inteligente de múltiples fuentes de datos y la optimización de los datos de los sensores.

En los últimos años la reconstrucción de edificios de forma automática se ha centrado en dos tipos de tecnología de sensores, aplicada a la geometría de los edificios, los sensores escáner láser y los sensores ópticos. Estos sensores se utilizan comúnmente en la ingeniería inversa para la reconstrucción de modelos digitales tridimensionales y han servido como una importante fuente de datos para una amplia variedad de aplicaciones desde hace décadas.

La Tecnología de Escáner Láser

Es una tecnología activa, que permite determinar la distancia de un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un láser pulsado, analiza el objeto o escena para reunir datos de su forma, en dos direcciones tanto horizontal como verticalmente, desde la posición del sensor, almacenando millones de puntos por minuto (en los últimos modelos), dependiendo del instrumento y del enfoque de su empleo. La salida de este proceso es un modelo 3D altamente detallado, llamado *"nubes de puntos".* Los puntos se almacenan como coordenadas 3D en un sistema fijo al escáner y también se almacena la amplitud de la señal reflejada (intensidad). En algunos casos estos instrumentos capturan de forma paralela el color mediante sensores fotográficos. El primer láser operativo fue demostrado en mayo de 1960 por *Theodore Maiman* en los laboratorios *Hughes Research Laboratories*.

Dado que la mayoría de levantamientos tienen formas complejas, se deben realizar posiciones desde diferentes orientaciones, cubriendo en su mayoría la geometría del objeto. Estas posiciones de escaneo deben ser unidas unas con otras con controles de precisión y ser referenciadas a un sistema de coordenadas geodésicas (georeferenciada), para la integración de bases de datos TLS.

Hay que tener en cuenta que la tecnología avanza rápidamente y se desarrollan nuevas tecnologías, que utilizan sistemas basados en nubes de puntos (en relación a la captura de más información), ejemplo de ello son los avances de la *University of Michigan* en escáneres que trabajan en un campo del espectro de la luz infrarroja y sus aplicaciones en identificación de materiales (VINAY 2013).

2.3.1 Sistemas de pulso, escáner de tiempo de vuelo

Una propiedad fundamental de las ondas de luz es su velocidad de propagación, en un medio dado las ondas de luz viajan con una velocidad finita y constante. La medición del tiempo que tarda la luz en viajar de la fuente a una superficie reflectante y de nuevo a la fuente permite evaluar la distancia entre ambos. Los sistemas de tiempo de vuelo (*time-of-flight TOF*) se basan en dicho principio, siendo

la distancia la mitad de la distancia de tiempo de vuelo, junto con el ángulo de desviación del pulso láser en relación al emisor láser.

Este tipo de escáneres no suelen usar haces continuos, sino pulsos láser, entendiendo que el emisor no puede enviar un pulso hasta que haya recibido el anterior, un factor que determina su máxima frecuencia. Esta restricción evita la confusión en la llegada de los pulsos, este parámetro depende de la duración del pulso y de su frecuencia y recibe el nombre de máximo rango de certeza. Gracias a la alta concentración de energía que se trasmite en los sistemas de pulsos, el alcance señal-ruido (SNR) permite mediciones a grandes distancias. El inconveniente es el problema de detectar la llegada exacta de los retornos dispersos, debido a la naturaleza cambiante de las tolerancias ópticas y a la atenuación atmosférica (LERMA, y otros 2008). El alcance de este sistema varia en relación al instrumento, con resoluciones menores a 10mm o llegando al orden de Kilómetros.

Ejemplo de este tipo de láser es el Riegl z420i, con un campo de visión de 360º H * 80º V, con 10 mm de precisión y capturando datos en rangos de entre 2 m a los 250 m, adquiriendo 1.5 millones de puntos entre 5-10 min, con un ángulo de resolución de 0.1º.

2.3.2 Sistemas de cambio de fase

Los sistemas de cambio de fase se diferencian de los sistemas de pulsos, en que la distancia se mide desde el cambio de fase del láser en lugar del tiempo de vuelo, la luz emitida (incoherente) se modula en amplitud[5] y se envía a una superficie, luego la reflexión dispersa se captura y un circuito mide la diferencia de fase entre las ondas enviada y recibida, y por tanto la demora.

Similar a los escáneres de tiempo de vuelo, los escáneres de modulación continua del haz tienen un máximo rango de certeza, en estos sistemas el alcance está limitado al que corresponde a un retardo de fase de un ciclo de la onda senoidal (LERMA, y otros 2008). Sus rangos son más cortos que los sistemas de pulso, mientras que la precisión es mayor.

Los sistemas de cambio de fase, también tienen una tasa de medición muy alta (puntos por segundo emitidos), al ser un proceso continuo, en el orden de 20 a 720 millones de puntos por posición de exploración, lo cual repercute significativamente en los procesos subsecuentes.

Ejemplo de ello es el Faro Focus^{3D}, este sistema permite un amplio campo de visión 360º H * 305º V, con una precisión de 0.6 mm @ 10 m, 0.95 mm @ 25 m (longitud de onda de 905 nm), ≤ ± 2 mm de error a una distancia sistemática de 25 m, registrando 38 millones de puntos entre 5-10 minutos a una resolución de escaneo de 1/8, aparte de la información de intensidad se registra el RGB, con una cámara integrada de 70 megapíxeles (F. REMONDINO 2011).

2.3.3 Escáner Láser Aerotransportado

Escáner Láser Aerotransportado (ALS) se basan en los principios de tiempo de vuelo o cambio de fase anteriormente explicados. Los datos se recogen en dos movimientos, uno longitudinal en sentido

[5] La señal se modula utilizando: modulaciones sinusoidales, ampliada modulada (AM), frecuencia modulada (FM), pseudo ruido o modulación polarizada.

de la trayectoria del avión (o helicóptero) y otro trasversal mediante un espejo móvil que desvía el haz de luz, complementario a ello se necesita conocer las coordenadas de la nube de puntos dado el movimiento del avión en el proceso de registro, obteniendo la posición del sensor y el ángulo del espejo en cada momento, apoyado en un sistema GPS diferencial y un sensor inercial de navegación (INS).

Los LiDAR aéreos permiten la captura de múltiples retornos del láser, especialmente útiles en zonas con vegetación, estos retornos se deben a la huella del pulso láser, por su tamaño alcanza múltiples superficies, en el caso de la vegetación las ramas pueden retornar pulsos intermedios y el ultimo pulso se puede interpretar como la superficie más cercana al suelo.

La nube de punto resultante se almacena en grupos o clases correspondientes a través de técnicas de filtrado, algunos programas de escaneo producen un conjunto de puntos que representan los retornos que se han reflejado del suelo desnudo, almacenando el resto de puntos en un conjunto sin clasificar, otros programas utilizan algoritmos para clasificar grupos preestablecidos. Como estándar internacional se utiliza mayormente la clasificación de los datos LiDAR según la Sociedad Americana de Fotogrametría y Percepción Remota/Teledetección (ASPRS) de Octubre de 2010.

Un ejemplo de ALS es el *Toposys Falcon* III, con una precisión de 1cm, opera a una altura menor de 2,500m, ángulo de 28º, con múltiples retornos hasta 9 (opción *full waveform*), con una longitud de onda de 1,550nm, el láser se orienta con fibra óptica y se utiliza tanto en aviones como en helicópteros (F. REMONDINO 2011).

2.3.4 Cartografía (*Mobile Láser Scanning* MLS)

Los sistemas móviles optimizan los métodos de captura TLS tradicionales. En estos sistemas se utilizan sensores de inercia *(Inertial Measurement Unit IMU)*, GPS y cámaras, en la cima de vehículos. La colección de datos IMU y GPS permite una captura de datos parecida a los sistemas aerotransportados ALS, transformando cada punto en un sistema de coordenadas globales, en relación al primer punto de captura de información, de forma automática. La densidad de nubes de puntos no es tan alta como la de escáneres TLS estáticos, con limitantes semejantes a los ALS, en relación a la calibración del sistema, errores de rango, trayectoria y de los sensores GPS/IMU, con errores de centímetros, siendo significativamente menores en comparación a los escáneres aéreos, por ser más corto los erres angulares.

La precisión depende principalmente de la señal GPS, la cual disminuye en zonas con vegetación alta, siendo un problema para los escáneres móviles, que los escáneres aéreos no presentan (S. PU 2010). La accesibilidad a los espacios también es una limitante, ya que los cascos históricos pueden restringir el acceso a los vehículos, también se ven limitados por problemas de oclusión que impiden registros de zonas complejas (BRENNAN, CANTER y VAN RENS 2007).

2.4 Estado del arte Digitalizadores Ópticos Activos

Los sistemas de escaneo por medios ópticos son extensos, por ello solamente se explicaran los activos, con los sistemas de Triangulación óptica y los sistemas de luz estructurada. En términos

generales se pueden dividir en las siguientes categorías (PAVLIDIS, y otros 2007) basados en: técnicas de láser escáner, forma desde la luz estructurada, forma desde la silueta (fotos desde diferentes ángulos), forma desde información en estéreo, forma desde vídeos, forma desde iluminación, forma desde la textura, forma desde la Fotogrametría, forma desde el enfoque, forma desde la información de sombra.

2.4.1 Sistema de triangulación óptica

Los láseres escáner por triangulación utilizan los principios de trigonometría, dirigiendo un patrón sobre un objeto y la utilización de una cámara para buscar la localización del mismo. El emisor láser y la cámara se instalan con un ángulo constante, creando un triángulo entre ellos y la proyección del láser sobre el objeto. La proyección del láser cambia el campo de visión en función a la distancia. La distancia entre el emisor láser y la cámara es conocida[6], el ángulo del emisor láser también es conocido (*α)*, el ángulo de la cámara (*β*) puede ser determinado encontrando la localización del haz láser en el campo de visión de la cámara. Estos tres elementos permiten conocer la forma y tamaño del triángulo, proporcionando la profundidad exacta del objeto medido (LERMA, y otros 2008)**.**

Los escáneres por triangulación alcanzan precisiones muy elevadas, del orden de micras, se utiliza generalmente para las obras de arte así como para detalles en las partes seleccionadas de monumentos arquitectónicos.

Un ejemplo de esta clase de sistema es el Konica Minolta vivid 910, genera una nube de puntos en base a una malla reticular, que relaciona los puntos en su barrido, de forma de plano, desde la posición del escáner láser, el haz de luz se direcciona con un espejo y cada línea es observada por un cuadro único capturado por un CCD de la cámara (24bits), formando el triángulo que define el sistema. La profundidad optima de escaneo varía entre 0.6 a 1.2m, la precisión oscila en relación al objetivo, el TELE es de x 0.22mm y 0.16mm z 0.1mm, llegando a conseguir hasta 300.000 vértices en 2.5 segundos. Al ser sistema óptico, la luz intensa (exterior) impide una correcta lectura del láser, con un límite de luz ambiental de 500 lx (Minolta, Catalog for 3D Mesurement, Konica Minolta, investement Ltd. 2002).

2.4.2 Sistema de luz estructurada

El sistema de luz estructurada es una variación de los sistemas de triangulación, pero en lugar de mover o rotar el láser para cubrir el objeto, se proyectan patrones que cubran todo el objeto a la vez, estos patrones pueden ser de puntos, líneas, patrones especialmente codificados que modulan su frecuencia o fase en el tiempo, incluso se utilizan patrones asados en el efecto Moiré[7] para aumentar la precisión y robustez de estos sistemas.

---

[6] Entre mayor es la distancia entre la cámara y el emisor láser menor es el error en la estimación de la profundidad del objeto, sin embargo esta distancia no puede ser muy grande porque estos dos elementos tendrían un solape en el campo de visión muy reducido y la proyección del láser no siempre podría ser capturada por la cámara.

[7] "El efecto Moiré se produce como resultado de interactuar juntas dos señales con amplitud modulada. Este fenómeno se observa en la televisión cuando se entrevista a gente que viste alguna prenda de ropa a rayas. Un escáner Moiré proyecta un patrón regular sobre el objeto a escanear mientras que la cámara que toma la escena tiene integrado otro patrón regular. La interferencia de estos dos patrones genera un patrón Moiré a partir del cual se pueden determinar cambios precisos de profundidad" (LERMA, y otros 2008).

Complementario a los sistemas de luz estructurada se pueden realizar procesos de *Reflectance Field (RF),* es una técnica que utiliza diferentes focos de iluminación sobre un modelo desde todos los ángulos posibles, para analizar las diferentes clases de iluminación y como afectan al objeto, con una rapidez de 320 focos en 5 minutos, permitiendo recrear sobre un objeto todo tipo de iluminación, en un entorno virtual en tiempo real. Esta información se fusiona con el escáner, ya que en el mismo proceso de RF proyecta unas líneas de luz que iluminan el objeto mediante franjas paralelas y se graba en video al igual que el RF, llegando a una resolución mayor del detalle de los materiales y su porosidad, aunque estos estén en movimiento.

Con este proceso se ha permitido ampliar el conocimiento sobre la iluminación y entornos virtuales, llegando a una nueva etapa de hiperrealismo, ya que la realidad puede ser simulada bajo cualquier ambiente digital, la reflectancia complementada con el escáner métrico permite generar mapas de vectores de normales, que aumentan el detalle del escáner a una resolución de micras (WAN-CHUN 2007).

2.5 Análisis del error TLS

Los levantamientos arquitectónicos[8] necesitan estándares de precisión. Igualmente los instrumentos deben cumplir estándares, relativo no solo a la posición de puntos y objetos, sino de la precisión de los resultados. En los levantamientos tradicionales, topografía y Fotogrametría, se definen los objetos que se observan utilizando ajustes de mínimos cuadrados, generando una información con resultados de precisión y exactitud de las observaciones.

En el caso de los TLS un número muy elevado de coordenadas tridimensionales son medidas en muy poco tiempo, sin discriminar elementos relevantes como esquinas o bordes, al no ser registrados de forma directa, en lugar de ello se modelan desde la nube de punto como un postproceso. Como no es posible escanear un objeto desde diferentes puntos de vista al mismo tiempo, es difícil que se almacenen los mismos puntos en escaneos diferentes. Todas las nubes de puntos producidas por un láser escáner contienen un número considerable de puntos que muestran errores groseros (BOEHLER, BORDAS-VINCENT y MARBS, Investigating Laser Scanner Accuracy 2003). Los errores de escaneado se pueden dividir en cuatro categorías: errores instrumentales, errores relacionados con los objetos escaneados, errores por condiciones ambientales y errores metodológicos (LERMA, y otros 2008).

A) Errores instrumentales

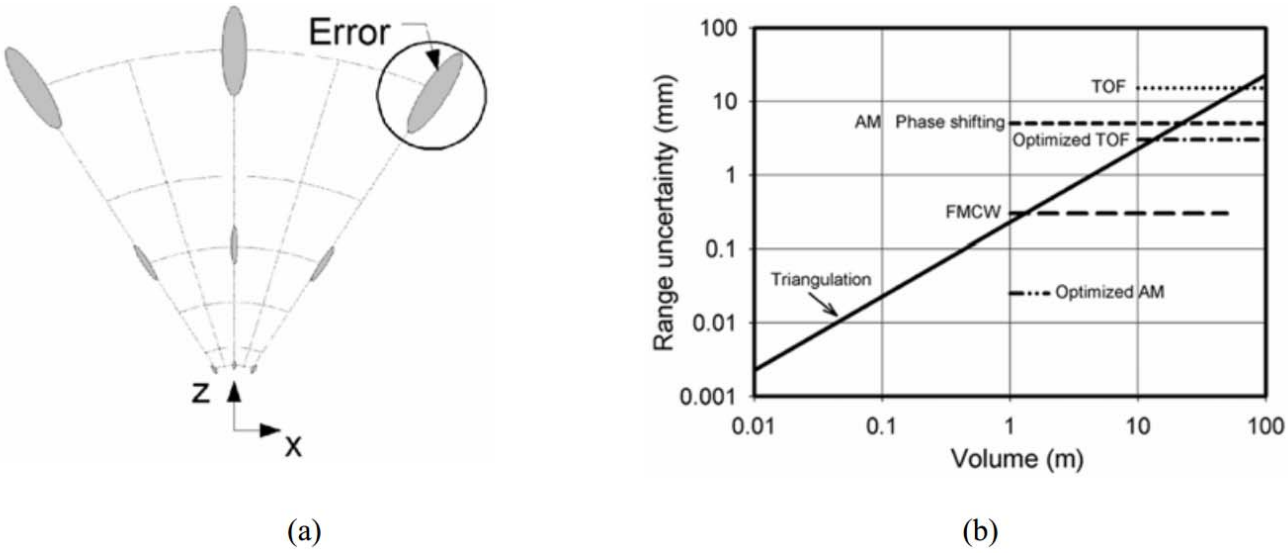
- **Propagación del haz láser:** La divergencia del haz[9] incide en la resolución y en la ambigüedad de localización del punto medido, en relación a la huella del haz proyectado.
- **Problema del borde partido:** Cuando el haz choca con un borde[10], este se divide en dos, una de estas alcanza otra superficie, estos dos pulsos se calculan, tomando como resultando la media de las señales para un mismo pulso, generando ruido en los bordes de los objetos.
- **Ambigüedad en la distancia:** Los errores relacionados a la distancia dependen directamente del sistema de medición del láser, como lo es la fuente de poder, la distancias a la que trabaja

[8] Revisar capítulo 3.1 Concepto de levantamiento arquitectónico
[9] Divergencia del haz: anchura que alcanza el haz con la distancia recorrida.
[10] Aunque los escáneres de menor anchura del has reducen este error, este aumenta a la distancia

el TLS, los mecanismos de orientación del láser, la modulación del láser, al igual que las propiedades reflectantes del material, este error se puede medir mediante algoritmos (BERALDIN 2005), siendo un resumen de ello la Ilustración 9, teniendo en cuenta las diferentes tecnologías TLS.

- **Ambigüedad angular:** El pulso de láser es desviado por un dispositivo de rotación pequeño (espejo, prisma) y se envía desde allí al objeto. Los errores causados por los dispositivos de lectura angulares darán lugar a errores perpendiculares a la trayectoria de propagación. Estos errores pueden ser detectados mediante la medición de distancias horizontales y verticales cortas entre objetos y la comparación con métodos topográficos más precisos.
- **Errores en los ejes de un TLS:** La calibración del TLS tiene que tener en cuenta los ejes: eje horizontal en relación al espejo de escaneado, eje de colimación es el eje que pasa por el centro del espejo escaneado y el centro de la huella del láser sobre la superficie del objeto escaneado y eje vertical que permite la rotación de la cabeza del escáner o el eje ortogonal a los ejes de oscilación de los espejos.

Ilustración 9: (A) Representación de la distribución espacial del error. (B) Grado de ambigüedad en la distancia de distintos TLS



Fuente: (BERALDIN 2005)

B) Errores relacionados con los objetos escaneados

- **Reflectancia:** Los TLS miden la reflexión del haz, siendo afectado por las leyes físicas de la reflexión y las propiedades ópticas de los materiales. Esta reflexión es difusa, dando lugar a rayos reflejados en diferentes direcciones, afectando el láser por la absorción de la señal en el viaje por el aire, la reflexión del material sobre el que se mide y el ángulo de incidencia entre el láser y la superficie medida. Siendo más débil la señal reflejada de superficies negras generando ruido, al contrario las superficies brillantes permiten mediciones más fiables, mientras que las superficies altamente reflectantes desvían totalmente la señal, generando ruido, denominado *speckle.*

- **Reflectividad:** Algunos materiales tienen una capa semitransparente no homogénea (como el mármol, la madera, entre otros), permite el paso del láser y su has se refracta, reflejándose en el propio material, esta refracción y reflexión se traducen en ruido en la superficie.
- **Color:** En determinados escáneres el color puede afectar la longitud de onda del escáner utilizado (CLARK y ROBINSON 2004), en el caso de escáneres ópticos que trabajan en micras la afectación del color puede generar un relieve en zonas que carecen de este (CORSO 2009).

C) Condiciones ambientales

- **Temperatura:** Las altas temperaturas de los materiales pueden reducir la señal del has, estas temperaturas afectan también el correcto funcionamiento de algunos escáner láser.
- **Atmósfera:** Los factores atmosféricos afectan a los escáneres de largas distancias, en ellos se aplican parámetros de corrección atmosférica, ya que la temperatura, presión y humedad (presión del aire) modifica la longitud de onda electromagnética, por ejemplo a temperaturas de 10ºC presión 35hPa se produce un error de 1mm a los 100m (LERMA, y otros 2008).
- **Distorsión por movimiento:** Dado el tiempo de escaneo las vibraciones pueden afectar la precisión.

D) Errores metodológicos: La elección del escáner, los parámetros de escaneo en relación al objetivo, resolución, densidad de puntos, utilización de sensores internos del TLS y características propias de cada instrumento de captura, pueden generar errores de precisión, de exactitud de georreferenciación de los modelos (BUILL, NUÑEZ y MARAMBIO, Estudio de la calidad en la medida con láser escáner 2007)

2.6 Metodologías TLS relacionadas con el patrimonio

Diversas organizaciones internacionales trabajan en el desarrollo de metodologías para el trabajo con información patrimonial, algunas de ellas enfatizando en la estandarización de metodologías TLS, ejemplo de ello son: (EPOCH, D4.2.1.: Report on Standards". Excellence in Processing Open Cultural Heritage 2002), (EPOCH, A Survey of Documentation Standards in the Archaeological 2006), (W3C, The World Wide Web Consortium 2015), (W3D, Web 3D Consortium 1997). Algunos centros especializados en patrimonio plantean la utilización de archivos virtuales 3D, enfocados a divulgar el patrimonio (KOLLER, FRISCHER y HUMPHREYS 2009).

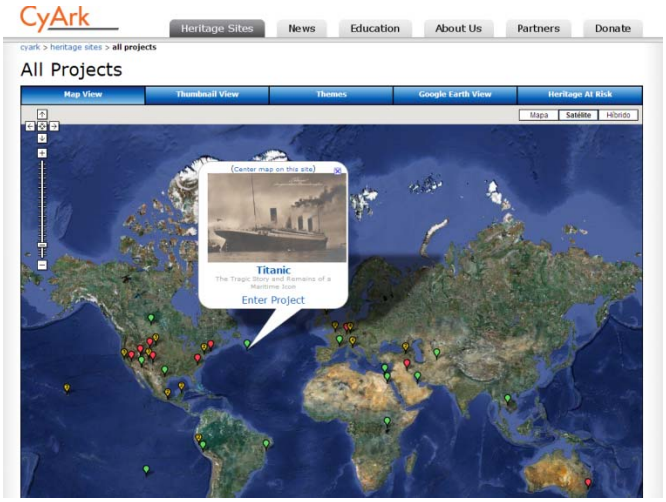
Parte del esfuerzo de estos proyectos es en la unificación de los metadatos. Ello requiere una estandarización de las metodologías, paralelo a la centralización de los archivos, la evaluación de resultados de levantamientos arquitectónicos. Destacamos los siguientes proyectos:

- *Stanford Digital Michelangelo Project*[11]
- *Stanford Digital Forma Urbis Romae Project*[12]
- *UCLA Digital Roman Forum, CyArk 3D Heritage Archive*[13] *(*Ilustración10)

[11]http://graphics.stanford.edu/data/mich/
[12]http://formaurbis.stanford.edu/
[13]http://archive.cyark.org/project-world

- *The Digital Archive Network forAnthropology and World Heritage (DANA-WH)*[14]
- *The Digital Hammurabi Project Johns Hopkins University, e Arts and Humanities Data Service (AHDS)*[15]
- *Perseus Project*[16]

Ilustración10: CyArk 3D Heritage Archive



Fuente: http://archive.cyark.org/project-world

Diversas publicaciones de la institución *English Heritage* establecen estándares para homogenizar levantamientos, desde normas de seguridad, hasta llegar a establecer términos estándar en la administración de base de datos y metadatos (BRYAN y BLAKE, Metric Survey Specifications for Cultural Heritage 2009) (BRYAN, An addendum to the metric survey specifications for English Heritage 2006), los capítulos se desarrollan en base a estos apartados: establecer las condiciones generales de los proyectos, rendimiento - control métrico del levantamiento, formatos, presentaciones, manejo de datos, especificaciones para levantamientos basados en imágenes y topografía, especificaciones para medir edificios en los levantamientos arquitectónicos, especificaciones para colectar y archivar datos de escáner láser terrestres.

De los estándares mencionados cabe destacar los relacionados al rendimiento, estableciendo tolerancias para el control métrico, Tabla 1. La escala de captura debe ajustarse a una densidad de captura que es a lo sumo la mitad del objeto más pequeño a ser registrado. La ventaja de una técnica indirecta como la TLS es la captura de la información sin selección, existiendo un balance en relación al uso final y el costo.

[14]http://2b.b.1243.static.theplanet.com/home/
[15]http://www.jhu.edu/digitalhammurabi/
[16]http://www.perseus.tufts.edu/hopper/

Tabla 1: Escalas de tolerancia y densidad de las nubes de puntos

Precisión		**Densidad de puntos / porcentaje de captura**			
Tolerancia máxima requerida para un detalle con precisión		**Distribución requerida para medir puntos**			
escala	Precisión aceptada	**escala**	Nube puntos	digitalización[23]	*Field survey*
1:10	+/- 5mm	**1:10**	1mm	1-15mm	2-30mm (max 0.5m)
1:20	+/- 6mm	**1:20**	3mm	3-30mm	5-60mm (max 1m)
1:50	+/- 15mm	**1:50**	5mm	5-50mm	10-100mm (max 2m)
1:100	+/- 30mm	**1:100**	15mm	15-100mm	20-200mm (max 3m)
1:200	+/- 60mm	**1:200**	30mm	30-300mm	50-600mm (max 5m)
1:500	+/- 150mm	**1:500**	75mm	75-750mm	0.1-1.5mm (max 10m)

Fuente: *Metric Survey Specifications for Cultural Heritage* pág. 21 *(BRYAN y BLAKE, Metric Survey Specifications for Cultural Heritage 2009)*

Con el fin de convertir los datos del levantamiento en productos útiles, se deben realizar mediciones adicionales, para proporcionar cierto control métrico, generando una salida predefinida según el proyecto, la mayoría de metodologías y productos base se esquematizan en la Ilustración 11. La metodología resalta la etapa de registro o alineación de las nubes de puntos, en relación a la exploración completa del objeto escaneado, estructura o emplazamiento, pasando de posiciones con coordenadas arbitrarias a posiciones y orientaciones concretas. Si los datos recogidos precisan de un sistema de coordenadas serán necesarias mediciones topográficas adicionales.

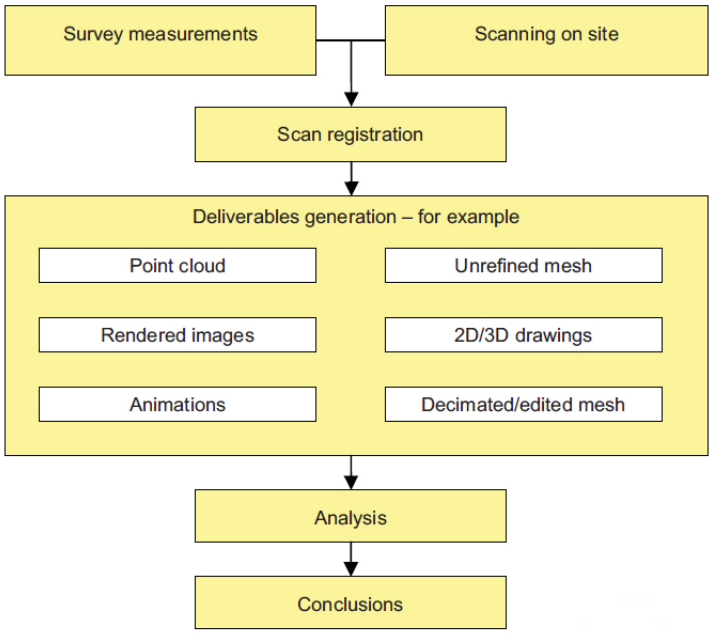
Las metodologías que se desarrollan relacionan rendimiento, costes y objetivos. Ejemplos de ello se ve en la guía de principios para el registro, documentación y manejo de información para la conservación de lugares patrimoniales de (LETELLIER, Recording, Documentation, and Information Management for the Conservation of Heritage Places 2007), en este se plantea que los levantamientos TLS viene asociado con unos gastos, y que para buscar su rentabilidad hay que evaluar los beneficios directos e indirectos, plantea los siguientes puntos a considerar en el desarrollo metodológico:

- Datos de referencia fiables para monitorizar cambios
- Mejor gestión en la conservación preventiva
- Mejora de la planificación basada en prioridades
- Cuantificación más realista y optimizando los presupuestos en base a las necesidades de conservación
- Rápida obtención de datos relevantes para los involucrados en la conservación patrimonial
- Mejora de la comunicación interdisciplinaria
- Reducir la duplicación de trabajo
- Menos errores de planificación a través de la toma de decisiones basada en una mayor información
- Especificaciones más claras a los contratistas
- Facilitar el control de los logros del proyecto

[23] Para modelos estéreo fotogramétricos o nube de puntos: el valor más alto en cada rango representa el intervalo de puntos máximo permitido.

- Mayor visibilidad de los proyectos a través de la información escrita y visual para la promoción y recaudación de fondos

Ilustración 11: Metodología de levantamiento de escáner láser típica



Fuente: 3D Láser Scanning for Heritage. (BARBER y MILLS 2011)

2.6.1 Metodología del LMVC

La metodología del Laboratorio de Modelización Virtual de la Ciudad parte de la utilización directa de las nubes de puntos TLS. Las principales ventajas de utilizar esta metodología en la creación de un modelo de nube de puntos son (MARAMBIO, Aplicaciones del láser escáner terrestre en el patrimonio arquitectónico 2007):

- El levantamiento no se limita el uso de un solo instrumento gracias a la incorporación en el registro de programas de ingeniería inversa.
- Se reduce tiempo en campo de manera significativa gracias a la reducción en el uso de puntos de control. Por una parte no es necesario montar y desmontar las dianas; y el tiempo de barrido se reduce hasta en una tercera parte.
- Se consiguen resultados válidos alternativos si se aprovecha la gran densidad de puntos que generan los escáneres láser y evita el complejo proceso de triangulación de la nube de puntos.
- La eficiencia de los escáneres láser en la captura de información 3D en poco tiempo y un post proceso continuo, plantean nuevas formas de documentar el Patrimonio Arquitectónico.

La metodología desarrollada incluye las siguientes etapas: Toma de datos, post proceso y explotación 2D y 3D del modelo de nube puntos, Ilustración 12.

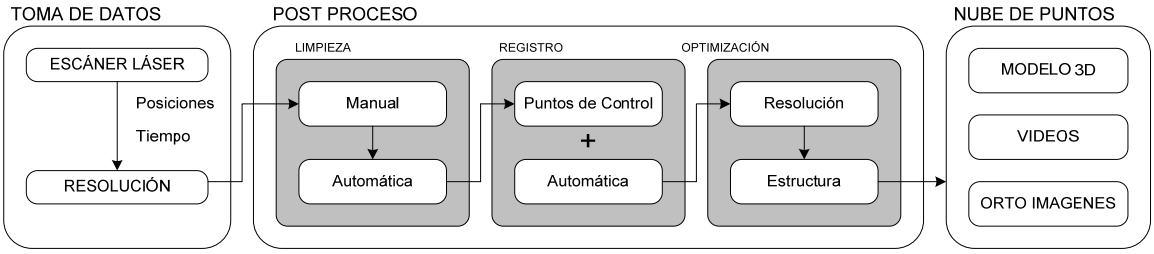
Toma de datos: El primer paso es la definición del escáner a utilizar en relación a la escala del proyecto y a las necesidades planteadas. Existe una preparación preliminar, teniendo en cuenta: trámites administrativos, definición de un horario más adecuado en relación a las actividades del lugar, condiciones climáticas y asegurar el suministro de energía y estado del equipo. Posterior a ello se planifica las posiciones, el orden del levantamiento, en relación al tiempos de escaneo.

Post proceso: En esta etapa la información recogida en campo pasa una serie de procesos para filtrar y unir la información en un único modelo.

- Limpieza: eliminar toda aquella información que no se desea, ya sea de forma manual o de forma automática. En ambos casos se requiere de personal capacitado que reconozca y valore la información que no pertenece al objeto de estudio.
- Registro: encontrar la posición y rotación del instrumento para cada barrido en un sistema de coordenadas específico. Esto se puede hacer a través de puntos de control o programas de ingeniería inversa.
- Optimización del modelo: creación de un modelo homogéneo. El modelo se estructura y divide en partes para facilitar su manejo y comprensión.

Explotación 2D y 3D del modelo de nube puntos: Al avanzar la tecnología es cada vez es más sencillo visualizar y gestionar un mayor número de puntos en tiempo real. Los visualizadores permiten explorar el modelo y generar las vistas necesarias para una mejor comprensión del objeto de estudio.

Ilustración 12: Metodología para la generación de orto imágenes LMVC



Fuente*:* (MARAMBIO y GARCÍA-ALMIRALL, Escáner Láser: Modelo 3D y orto imágenes arquitectónicas de la iglesia de Santa Maria del Mar de Barcelona 2006)

Equipos del LMVC

En la publicación de (F. REMONDINO, Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning 2011) se detalla la comparación entre instrumentos TLS y otros equipos de toma de datos activos y pasivos, permitiendo una mayor compresión de las limitantes técnicas de los mismos.

El LMVC cuenta con cuatro escáneres, en la actualidad de forma activa se utilizan los ejemplificados en la Ilustración 13. Los cuales corresponden a:

Escáner de tiempo de vuelo RIEGL LMS-Z420 (Riegl 2013). Principales características: Es un escáner láser de mediano alcance y alto rendimiento, de clase 1, con un rango de 2 - 300 m de distancia, con precisión de 10mm, con un ángulo de paso de 0.004º, el ángulo de captura es de 80°

vertical y 360° de campo de visión. En un proceso de actualización se le incluyo un inclinómetro (2012). Sus principales usos abarcan los campos de: Topografía-minería, monitorización, arqueología-patrimonio cultural, modelos urbanos, ingeniería industrial, inspección, ingeniería inversa y paisajismo.

Escáner de fase, Faro Focus^{3D} (Faro 2013).Principales características: Es un escáner láser de largo alcance y alto rendimiento, clase 3, con un rango de escaneo entre los 0.6 - 153m cuando hay luz ambiental baja con 90% de reflectividad en la superficie, en días nublados con 90% de reflectividad de la superficie tiene un rango de 0.6m - 120m, con una precisión de 7mm, tiene un compensador de dos ejes, altímetro, compas, WLAN (WiFi), integra una cámara de 70 megapíxeles, la velocidad de media es de: 122,000 / 244,000 / 488,000 / 976,000 puntos/segundo, el ángulo de captura es de 320° vertical y 360° de campo de visión. Sus principales usos abarcan los campos de: Topografía-minería, monitorización, arqueología-patrimonio cultural, modelos urbanos hasta cierto límite, documentación de interiores, procesos industriales, inspección e ingeniería inversa.

Escáner de triangulación Konica Minolta Vivid 910 (Minolta 2013). Principales características: Es un escáner de corto alcance, se basa en el principio de triangulación método de bloques de luz, es de clase 2 (IEC60825-1) Clase 1 (FDA), con un rango de escaneo entre 0,3 - 1,5 m, con una precisión de 1mm, la densidad de puntos varia en relación a los tres lentes focales intercambiables que posee: el TELE distancia focal de 25mm, el MIDDLE distancia focal de 14mm y el WIDE distancia focal de 8mm, su resolución máxima es de X: ±0.22mm, Y: ±0.16mm, Z: ±0.10mm a un plano con el lente TELE, su campo de visión es de 5.7- pulgadas LCD (320 × 240 pixeles), con el mismo sensor que recoge datos de la triangulación (CCD) adquiere las fotos, con una resolución de 640 × 480 pixeles. Sus principales usos abarcan los campos de: monitorización, arqueología – patrimonio cultural, ingeniería inversa e industrial.

Ilustración 13: Equipos del LMVC, tiempo de vuelo, diferencia de fase y triangulación

Fuente: (Riegl 2013), (Faro 2013) *y* (Minolta 2013)

2.7 Procesos de unión entre posiciones

Los levantamientos TLS se realizan mediante la suma de tomas de datos, cada posición de datos adquiridos vienen condicionados al error del escáner utilizado, en diferentes tipologías de levantamientos, desde piezas arqueológicas hasta entornos Urbanos, con diferentes niveles de complejidad, de escala y de precisión.

El registro o unión entre posiciones es un paso fundamental en el proceso que conduce a la modelización, el desplazamiento o error de unión entre dos o más escáneres, impiden procesos posteriores, por ejemplo en uniones con errores de un centímetro se genera un ruido tal que hace inaprovechable dicha nube, lo cual es visible por ejemplo con la construcción de mallas libres en procesos semiautomáticos.

Al ser un proceso de partida y de carácter fundamental para la tecnología TLS, se plantea un resumen de las líneas de registro y unas consideraciones finales fruto de una investigación bibliográfica y de la experiencia obtenida en el Laboratorio de Modelización Virtual de La Ciudad.

Los procesos que se explicaran a continuación se centran en los procesos de registro previos a la modelación, entendiendo que existen otros procesos que se realizan en casos específicos después de procesos de segmentación. La ventaja del registro antes de la segmentación radica en el hecho de que se pueden revisar los errores rápidamente en la etapa de segmentación del registro. Pero en el caso de datos ruidosos, la segmentación antes del proceso de registro puede facilitar el cálculo de la transformación del registro.

2.7.1 Unión manual

Los procesos de registro manuales, parten de la identificación por parte de un operador de puntos correspondientes entre posiciones TLS, para que el valor de transformación de la posición sea calculado. Los puntos de referencia pueden ser elementos notables de la escena escaneada, también se utilizan objetos con un alto grado de reflectancia, para ser encontrados por programas de procesamiento de datos, como los mostrados en la Ilustración 14.

El mínimo número de puntos a calcular es tres, pero cuando el registro se realiza únicamente mediante resección (indirecto), se recomiendan cuatro puntos de control XYZ distribuidos adecuadamente. Con esto se consiguen más grados de libertad y, por tanto, se puede utilizar el método de los mínimos cuadrados para minimizar los errores en la captura de las dianas o blancos (LERMA, y otros 2008).

La mayoría del software comercial dispone de herramientas para unir posiciones TLS, a partir de la detección de dianas, los programas encuentran el centro de estos elementos, como puntos de correspondencia entre nubes de las posiciones, tras esta adquisición, nos aseguraremos de que hay al menos tres objetivos visibles de dos estaciones para el registro. Otro método de registro es medir con precisión los puntos característicos que aparecen en el gráfico de dispersión, utilizando una estación total.

Estos puntos de referencia proporcionan la base para la consolidación de la unión entre posiciones. La distribución de estos objetivos y la medición de estos afectan la exactitud de la unión, al igual que el error de la unión se encuentra en la distancia promedio que queda entre las dos nubes de puntos, en la que un mayor número de objetivos es muy deseable para compensar los errores eventuales de medición.

Ilustración 14: Ejemplos de objetos reflectantes: La esfera es del Faro Focus^{3D} y los cilindros del RIEGL z420i

Fuente: Propia

2.7.2 Unión automática, método ICP y Método DARCES

El principio de unión automática (unión 3D/3D o registro de nube a nube), es encontrar automáticamente un número de puntos "homólogos" en las nubes de puntos, para que desde estos puntos los parámetros de transformación (rotación y translación) sean computados, se consideran el mayor número de puntos en común, en base a sus características geométricas.

Los primeros métodos (CHEN y MEDIONI 1992) sugieren el uso de superficies tangentes para lograr el registro. Posteriormente se desarrollaron métodos que consideran los puntos, líneas, curvas como los elementos correspondientes (BESL y MCKAY 1992), gracias a su algoritmo conocido como *Iterative Closest Point* (ICP), la cual se ha desarrollado en los últimos años en diversas publicaciones y programas informáticos.

Este método se divide en dos familias de métodos para el registro de una nube: **los métodos mediante la realización de la correspondencia entre los puntos y los basados en la correspondencia entre las entidades geométricas.** De los métodos basados en la correspondencia entre los puntos, los dos más comunes son el **método de la "ICP" y los métodos "DARCES".**

Método "ICP" (Iterative Closest Point)

El método ICP es probablemente el más utilizado en los programas comerciales para llevar a cabo un registro automático entre dos modelos de datos geométricos. Mediante este método el registro es posible independientemente de la naturaleza de los datos geométricos (de los puntos, de las curvas de diferentes grados y de las superficies). Se trata de minimizar la distancia entre dos nubes, punto a punto, por iteraciones sucesivas. Entre nubes o grids, según sea el caso.

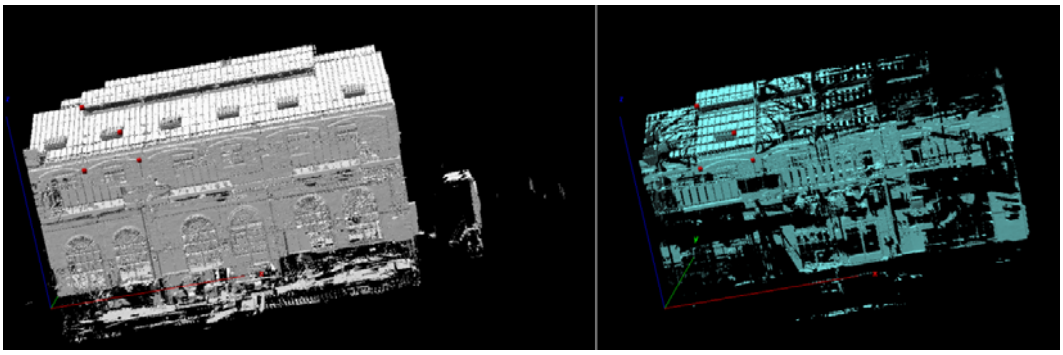
Las principales desventajas del método de ICP en su forma original son: en primer lugar que converge a un mínimo que puede ser falso, especialmente cuando hay una gran cantidad de ruido en los datos, y se necesita un gran número de iteraciones para la convergencia del modelo. Se han generado varias soluciones para superar estas desventajas, en las cuales critica el hecho de tener en cuenta todos los puntos de correspondencia, ya que no mejora los resultados y se propone una

alternativa de volver a muestrear la nube, lo que acentúa la complejidad geométrica de la escena y por lo tanto acelera la convergencia y la mejora de la alineación entre dos nubes de puntos.

Krebs en 1996 reconstruye el método ICP basado en lógica difusa, cada iteración mediante la introducción de una función de pertenencia, basada en el cálculo de las distancias de los puntos para transformar en puntos de la nube "modelo". Esta característica funciona muy bien cuando se trata de reconocer un objeto de forma conocida en una nube de puntos. Todavía hay métodos que adoptan el mismo principio (MITRA, GELFAND y POTTMANN 2004) (LI y WANG 2008).

A pesar de todos los estudios que tratan de encontrar automáticamente los valores iniciales del algoritmo ICP y acelerar su convergencia, se sigue utilizando en la industria una variante semi-automática, al dejar al usuario tres puntos correspondientes en dos nubes a registrar. Con estos puntos de partida, es posible calcular una transformación rígida inicial y luego comenzar las iteraciones. Este proceso se ejemplifica en la Ilustración 15, en la que se representa la agregación de una nueva posición, acercándola a las anteriores mediante puntos de control, para aplicar posteriormente una variación del algoritmo ICP de forma consecutiva hasta lograr la precisión requerida.

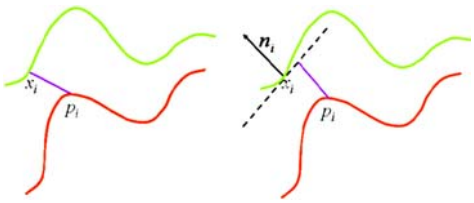
Ilustración 15: Ejemplo del registro interior de las Calderas de Fabra i Coats



Fuente: Propia

Sin embargo no siempre es posible encontrar puntos homólogos en las nubes de puntos, por lo cual se habla de “puntos de conexión”, si el algoritmo no los encuentra, tratará de sustituirlos por los puntos más cercanos. Besl y McKay, anteriormente mencionados, estudiaron las relaciones matemáticas necesarias para definir el punto más cercano (que pertenece a una serie geométrica) a otro punto conocido, Ilustración 16.

Ilustración 16: El punto más cercano al plano tangente a una superficie en un punto conocido



Fuente*:* (M. AL SHAWA 2006)

En la anterior se ha considerado que la distancia entre un punto y un conjunto de puntos, definidos por la distancia mínima entre este punto y cada punto del conjunto. El punto que permita el cálculo de este mínimo será considerado más cercano. Supongamos que *R* es la matriz de rotación y *T* es el vector de traslación. La función *f* para minimizar es descrita por la siguiente ecuación:

Ecuación 1: Consolidación de las nubes de puntos (*Lasergrammetrie* Terrestre)

$$f(R,T) = \frac{1}{N_p}\sum_{i=1}^{N_p}\|x_i - R.p_i - T\|^2$$

Fuente: (AL SHAWA, Tesis doctoral: Consolidation Des Nuages De Points En Lasergrammetrie Terrestre 1992), describe el proceso desarrollado por Besl y McKay, 1992.

R: matriz de rotación
T: traslación de vectores
N_p: número de puntos de la nube menos densa, en la zona en que se superponen las nubes
x_i: Nube de puntos "modelo" (considerada fija)
P_i: Nube de puntos homóloga "observador" (nube que se transforma rotación y translación)

Una vez estos parámetros se calculan, se le aplica a la nube homologa "observador" la transformación, y se vuelve a repetir las etapas precedentes de forma iterativa, hasta que se llegue a determinado umbral.

Para resolver los mínimos cuadrados de la ecuación se utiliza la minimización no lineal de *Levenberg - Marquardt* (FITZGBBON 2001) o la técnica de descomposición de valor singular (*SVD Singular Value Decomposition*), propuesto por (ARUN, HUANG y BLOSTEIN 1987) o los *cuaterniones*[24] por (HORN 1987).

Cabe destacar los desarrollos que se han dado en los últimos años por parte de programas libres, como Meshlab o Cloud Compare, que incluyen algoritmos ICP para la unión entre posiciones, la aplicación de estos algoritmos provienen de contribuciones tales como las herramientas de VCLab`s (CALLIERI M. 2003), con herramientas como Meshlign v2, que se han trasladado a otros programas libres. También destacar la incorporación de estos procesos en programas comerciales de los escáneres Láser, como en el caso de Faro scene 5.4, el cual incluye procesos de unión nube a nube.

Método DARCES

El método DARCES (Data - Aligned Rigidity - Constrained Exhaustive Search) es propuesto por (CHEN y HUNG, RANSAC-based DARCES: A New Approach to Fast Automatic Registration of Partially Overlapping Range Images 1999). Se ha diseñado específicamente para el procesamiento de datos en 3D, utilizando las ventajas del algoritmo RANSAC, para buscar la correspondencia entre las nubes de puntos. Este algoritmo comienza por la elección triplete aleatoria de la nube "observado", se calcula los parámetros de la esfera que pasa a través de estos tres puntos y a continuación se buscan los puntos de la nube "modelo" que pertenecen a la misma esfera.

[24] También llamados cuaternios, son una extensión de los números reales, similar a la de los números complejos.

Cuando este trío se determina, podemos calcular los parámetros de transformación y luego buscar los puntos que pertenecen a la nube "modelo". Este número se llama el número de superposición (*overlapping number*) y debe llegar a un máximo durante el procedimiento iterativo del algoritmo, el algoritmo por lo tanto, se detiene cuando las iteraciones llegan a un valor predeterminado.

2.7.3 Métodos basados en la detección de las entidades geométricas

Los métodos basados en entidades geométricas como objetivo para encontrar los puntos coincidentes, en función de dos entidades geométricas para el registro de las nubes de puntos, como por ejemplo una recta, Ilustración 17. Estos métodos suponen un reconocimiento previo de las entidades geométricas del objeto o la estructura del escaneado. El reconocimiento debe ser bastante preciso, porque la calidad del registro dependerá de esta detección.

Debemos recordar que estos métodos no son independientes del reconocimiento de las correspondencias de puntos. En efecto, la búsqueda de puntos de correspondencia se hace a menudo después de la extracción de las entidades geométricas deseadas. Por lo tanto, estos métodos pueden ser considerados como una extensión de los métodos mencionados anteriormente.

Ilustración 17: Detección de líneas de referencia entre posiciones como proceso de registro, Calderas de Fabra i Coats

Fuente: Propia

La ventaja principal de este método de entidades geométricas, se basa en que se pueden crear más parámetros para facilitar el establecimiento y el cálculo de la transformación desconocida. Otra ventaja es el hecho de que estos métodos no requieren sustitutos para inicializar la transformación. Sin embargo las limitantes de falta de detalle local son importantes, sumado con los problemas de tiempos de procesamiento, para extraer las entidades.

2.7.4 Precisión y exactitud alcanzada. Rendimiento alcanzado

De acuerdo con (CHEN y HUNG, RANSAC-based DARCES: A New Approach to Fast Automatic Registration of Partially Overlapping Range Images 1999), las principales limitaciones de las técnicas de registro automática se pueden resumir en tres puntos:

- Estas técnicas no siempre pueden garantizar una solución correcta, incluso en ausencia de ruido
- Estas técnicas requieren a menudo una buena estimación inicial de los parámetros de transformación entre dos nubes de puntos se registre
- Estas técnicas sólo podrán utilizarse si no hay suficientes índices locales (características locales), para el cálculo de los parámetros de las transformaciones

Complementario al proceso de unión en su componente automático y a modo de conclusión de la investigación realizada, se plantean aspectos a tener en cuenta a nivel de usuario, para la adecuada utilización de dichos procesos, enfatizando procesos de unión por iteración, mejorando su efectividad, en relación a precisión y rendimiento de los procesos:

Método topográfico *Closed traverse*: En proyectos Urbanos por su extensión, es necesario realizar un control por zonas, relacionando posiciones iniciales con finales de forma cerrada, tratando de imitar el proceso *Closed traverse* (BEDFORD y PAPWORTH 2009), llevado a cabo por estaciones totales o teodolitos.

Diferencias entre posiciones por el movimiento de los objetos: El registro ICP es un proceso estadístico, el ruido que produce una persona, cables, etc. no es significativo, pero en el caso de grandes flujos, o movimiento de masas de vegetación por el viento, aconsejamos realizar un proceso de limpieza de estos datos de forma manual. En el caso del segundo proceso de unión de la Vila Vella de Tossa de Mar, se recuperaron posiciones eliminadas por el ruido que presentaban, al ser en su mayoría de vegetación (sin información de fachada), lo cual permitió cerrar el registro por todos los frentes de las manzanas (*Closed traverse*).

Unir en más de una dirección: El promedio de error se acumula, por ello se aconseja evitar un registro en sentido lineal, con una tendencia de información mayor en un eje que en otro. Siendo los cruces de vías puntos de control y los centros de vías zonas de constante revisión, hasta lograr valores homogéneos. Aunque el error del instrumento es mayor a la distancia, realizar posiciones desde puntos altos permite confirmar el registro, en el caso de Vila Vella y el casco histórico de Lloret de Mar este proceso permitió consolidar el modelo en su totalidad, redistribuyendo el error en toda la extensión del levantamiento.

Calibración al usar programas específicos de los escáneres: Se debe tener en cuenta la calibración de los escáneres, al usar programas de detección de dianas, diseñados para escáneres específicos, especialmente al registrar en procesos manuales, ya que la reflectancia de las dianas pueden mostrar un halo alrededor del centro provocado por varios retornos, necesitando una calibración específica.

Estadística entre posiciones: Los escáner láser Terrestres tienen diferentes ángulos captura, de resolución y de precisión, al mismo tiempo estos pueden variar según la forma de escanear, por

ejemplo con la posición horizontal o inclinada del instrumento (como en el caso de Vila Vella), o simplemente por las distancias a las superficies escaneadas. Por ello para cada proyecto se debe realizar una comprobación de la media de error entre posiciones y la desviación estándar alcanzada, llegando a tener un promedio de error estadístico entre posiciones homogéneo. En el caso de Vila Vella se llegó a un error máximo de 0.00055m en la media y 0.0055m en la desviación estándar entre posiciones (Tabla 2).

Tabla 2: Ejemplo de estadística del registro

Indx	Conv	Mean	StdDev	Indx	Conv	Mean	StdDev	Indx	Conv	Mean	StdDev
2	2.3e-007	-0.000053	0.005071	18	0.000004	-0.000151	0.004524	31	0.000001	-0.000050	0.005038
3	1.7e-007	-0.000022	0.004987	19	0.000001	0.001112	0.004902	32	0.000001	-0.000399	0.005094
4	2.2e-007	-0.000003	0.004964	20	0.000004	0.000010	0.005112	33	2.0e-007	-0.000067	0.005189
5	1.3e-007	0.000032	0.004980	21	3.4e-007	-0.000076	0.005193	34	0.000001	-0.000098	0.004882
6	9.6e-008	-0.000028	0.004954	22	0.000009	0.000409	0.005287	35	9.9e-007	0.000154	0.005083
7	4.5e-007	-0.000077	0.005011	23	8.7e-007	0.000099	0.005236	36	1.5e-007	-0.000088	0.005044
8	1.5e-007	0.000179	0.004979	24	0.000001	-0.000139	0.005285	37	1.0e-008	-0.000145	0.005009
9	6.6e-007	0.000018	0.005005	25	3.0e-007	-0.000750	0.005163	38	1.4e-007	-0.000198	0.005008
10	0.000008	-0.000112	0.004873	26	3.9e-007	-0.000205	0.005090	39	6.1e-007	0.000375	0.005014
11	7.8e-007	0.000520	0.004890	27	4.6e-007	-0.000286	0.005078	40	3.6e-008	0.000909	0.005136
12	0.000001	-0.000439	0.004796	28	2.8e-008	0.000218	0.004982	41	0.000002	0.000163	0.005218
13	0.000001	-0.000068	0.005051	29	2.3e-007	-0.000380	0.005223	42	4.7e-007	-0.000161	0.005178
14	5.2e-007	0.000094	0.005078	30	0.000003	0.000038	0.005096	43	0.000009	0.000411	0.005164
15	4.3e-007	0.000105	0.005091	31	0.000001	-0.000050	0.005038	44	2.7e-007	0.000359	0.004971
16	9.0e-007	0.000076	0.005048	32	0.000001	-0.000399	0.005094	45	2.4e-007	0.000049	0.004940
17	2.2e-007	0.000229	0.005058	33	2.0e-007	-0.000067	0.005189	46	1.2e-007	0.000249	0.005205

Fuente: Propia

Evaluar la precisión y exactitud alcanzada: El residuo del registro global debe ser igual o mejor que la precisión geométrica requerida para los resultados finales (Tabla 2: Ejemplo de estadística del registro), según la escala de trabajo del proyecto. Se recomienda por ello incluir siempre los residuos del proceso de registro y las precisiones geométricas de los parámetros calculados en el informe del levantamiento. Según (NÚÑEZ, RODRÍGUEZ y BUILL 2008) *"cualquier levantamiento está sujeto a errores, los cuales pueden ser inherentes a la medida por el método o instrumento utilizado (error accidental), pueden deberse a un error en el mismo sentido y constante para un periodo de tiempo (error sistemático) o estar motivados simplemente por una equivocación (error grosero)… La precisión se puede entender como el número de cifras decimales con las que se representa una determinada magnitud. Por ejemplo, una distancia expresada en metros tendrá precisión milimétrica si se expresa con tres decimales. La exactitud es la fidelidad en la ejecución de una medida, es decir, la diferencia entre el valor medido y el valor real o valor verdadero de la magnitud medida".*

Dianas y blancos: Cada nube debe contener por lo menos cuatro coordenadas, distribuidas adecuadamente, minimizando el error de captura de las dianas con el método de mínimos cuadrados, evitando utilizar blancos naturales, ya que son menos precisos que las dianas artificiales. También se recomienda no colocar dianas artificiales en lugares que oculten detalles importantes del objeto, que las dianas no sean muy grandes y procurando no utilizar adhesivos que dañen el patrimonio.

Información complementaria: Añadir fotografías o impresiones de pantalla de elementos irregulares de las nubes de puntos producidos por quiebros o de elementos que se podrían malinterpretar como errores en el registro e indicarlo en el informe.

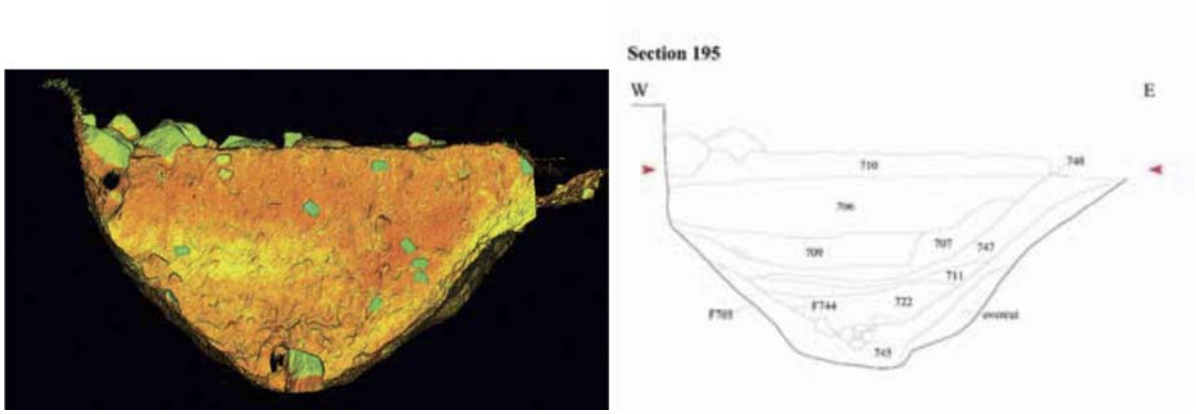
2.8 Información TLS

2.8.1 Información de intensidad entre escáneres TLS

Mientras que la información geométrica de los TLS es altamente explotada, la información radiométrica, proporcionada por la medición de la fuerza de la señal de retrodispersión, se utiliza con menos frecuencia. Los factores físicos tales como la reflectividad al objeto, que dependen de la longitud de onda, los factores geométricos como el ángulo de incidencia, la rugosidad de la superficie y la distancia entre el dispositivo al objeto y las condiciones atmosféricas influyen en la fuerza de esta señal. En general, esta señal (llamada intensidad) es una medida cualitativa de la fuerza relativa de la potencia de la señal recibida.

Sin embargo se puede encontrar proyectos relacionados con la explotación de la información de intensidad, como en la Ilustración 18. La mayoría de los escáneres operan fuera del espectro visible para el ojo humano, lo cual permite recoger la información de intensidad que suele ser ligeramente diferente a la observada en campo, siendo útil en algunos casos, en los que se diferencien niveles de la superficie o tipo de material, entendiendo que esta información solo se debe tomar en términos cualitativos, ya que procesos cuantitativos requerirían una cuidadosa calibración de los valores de las intensidades.

Ilustración 18: Un escáner de láser de una sección excavada, izquierda información de la intensidad y derecha un registro estratigráfico de la zanja hecha por un arqueólogo en el lugar



Fuente: (BARBER y MILLS 2011)

2.8.2 La fotografía en la tecnología TLS

El registro del color se realiza paralelo a la toma de datos, en relación directa a la ubicación de los sensores de captura, a continuación se describen los dos tipos de registro que se utilizan, el primero acoplando una cámara al escáner con su respectivo post proceso de alineación entre sensores ejemplificado con el Riegl z420i y el registro fotográfico incorporado en el escáner, ejemplificado con el escáner FARO Focus ^{3D} S 120.

Riegl z420i: Este escáner realiza un barrido de 360º en horizontal y de 80º en la vertical, mediante el traslape entre fotografías en un panorama, este traslape se define por el usuario, siendo usual usar 12 fotografías para una toma de datos de 360º. El barrido descrito se realiza desde un centro,

por lo cual la proyección de la información se puede describir en una esfera, en el caso del Riegl z420i al tener un ángulo de 80º en vertical se proyecta a un panorama, esto permite alinear virtualmente un panorama de color adquirido con una cámara digital profesional y la información del láser, mediante una alineación de los dos censores, ya que se conoce la distancia e inclinación exacta del escáner.

FARO Focus ^{3D} S 120: Posee una cámara integrada, de 70 megapíxeles, que adquiere 84 fotos por posición TLS. Al adquirir las fotos desde la misma posición en la que se emite el láser mediante espejos, la correspondencia entre estas dos bases de datos medidas y color son directas, reduciendo al mínimo el problema de paralaje entre ambas.

Iluminación

En la fotografía la iluminación es un tema central, incluye cuestiones de contraste y temperatura de la luz. Una fuerte expresión (por ejemplo, sombras, niebla, grano) puede ser interesante desde un punto de vista fotográfico, pero puede reducir la calidad como documento en el proceso de levantamiento patrimonial (S. D'AYALA 2003).

Desde el punto de vista de TLS es mejor tomar fotografías neutras, aumentando las características que puedan ser documentadas, un día nublado proporciona una luz difusa con pocas sombras, que permite una mayor uniformidad entre las fotos. Este hecho se enfatiza en levantamientos de entornos urbanos, ya que el sol se mueve entre posiciones TLS y las sombras cambian, como se ejemplifica en la Ilustración 19.

Los TLS que no tienen el sensor fotográfico incorporado, sino que utilicen una cámara digital profesional externa, permiten repetir el proceso fotográfico para una misma posición, con ello se da la oportunidad de adquirir fotos con diferentes valores de exposición[25], evitando fotos Infraexpuestas o sobrexpuestas.

Ilustración 19: Ejemplo de iluminación (a) 6/5/2003 14:29 f/5.6 1/350s, (b) 9/5/2003 10:40 f/2.8 1/225s, ciudad Bath

Fuente*:* (S. D'AYALA 2003)

[25]La exposición se controla con: la sensibilidad ISO – la apertura del diafragma – la velocidad de obturación, todos ellos relacionados entre sí.

Estas cámaras digitales profesionales permiten almacenar la información capturada sin perder datos, por ejemplo con el formato RAW (*Raw Disk File*, llamado en español formato de imágenes sin modificaciones), que contiene la totalidad de datos de la imagen como tal y como ha sido captada por el sensor de la cámara fotográfica, por lo general de 36 a 48 bits por pixel, estos valores se consideran valores de un rango dinámico alto HDR (*High dynamic range*). Ellos permiten modificar con mayor facilidad la iluminación y el detalle de las imágenes en la etapa de post proceso, Ilustración 20.

En los casos que solo se adquieran imágenes comprimidas en formatos que no sean HDR, se deben utilizar programas de iluminación profesional como por ejemplo *Lightroom* en Windows o *apertur* en Mac. Estos programas permiten modificar el histograma a profundidad, llegado a modificar diversos valores de la luz, como las luces altas, luces medias, zonas oscuras, con sombra, la exposición global, la recuperación del detalle, la luz de relleno, el brillo y el contraste.

En este proceso de edición se debe reducir las afectaciones producidas por las sombras, ya que estas pueden confundirse con los bordes de la edificación, parte fundamental para la interpretación métrica (BUCHANAN 1983)

Ilustración 20: Corregir sombras e iluminación de forma digital. Levantamiento del casco histórico de Cadaqués, LMVC

Fuente: Propia

El Color

En las cámaras digitales, el sensor o CCD es el chip encargado de la captura de la imagen, está compuesto por una malla de miles de celdas fotosensibles en las que se recibe la imagen formada por el lente, cada una de esas celdas genera una corriente eléctrica en presencia de la luz. Esa corriente eléctrica será luego convertida en datos numéricos que se almacenarán en forma digital

binario en la memoria de la cámara, dando origen a un píxel. Cada una de esas celdas genera una cantidad más o menos fija de corriente eléctrica (y por lo tanto de datos) al azar, aún en ausencia de la luz y en relación a la temperatura.

En el proceso de homogenizar posiciones TLS, el balance del blanco[26] y temperatura del color[27] es fundamental (Ilustración 21). Especialmente al unir posiciones en levantamientos urbanos, que integra posiciones lejanas con cercanas, registrando el color a diferentes horas del día, ya que en la mañana las imágenes en exteriores tienden a ser más rojizas y al final del día a ser más azules, por las condiciones atmosféricas.

La sensibilidad de cada uno de los elementos del sensor es fija, con un valor aproximado equivalente a 100 ISO. Los índices ISO superiores que nos ofrece la cámara digital se logran no por un incremento en la sensibilidad de los elementos captores, sino por una amplificación posterior de la señal que estos emiten.

Ilustración 21: Balance de blancos, levantamiento del casco histórico de Cadaqués, LMVC

Fuente: Propia

Como estos elementos tienen una emisión de señal de base más o menos fija, al capturar una señal lumínica débil y amplificarla, estamos amplificando también una buena porción de la emisión de datos aleatoria del chip, con lo que se mezclará una cantidad de señal aleatoria sin contenido a la señal correspondiente a la imagen, en la cual también se ve la problemática de destellos en el lente.

En tomas de datos de interior se entiende que la calidad de la imagen se usa la menor sensibilidad ISO equivalente, el uso de sensibilidades ISO mayores se traducirá en un aumento de pixeles distribuidos al azar, principalmente en las zonas de sombra de la imagen. El ruido, a diferencia del

[26] El balance de blancos es un control de la cámara que sirve para ajustar el brillo de los colores básicos rojo, verde y azul (RGB) con el objeto de que la parte más brillante de la imagen aparezca como color blanco, y la menos brillante como negro.

[27] La tempera del color es la dominancia de alguno de los colores del espectro lumínico sobre los demás, de modo que altera el color blanco hacia el rojo o hacia el azul en dicho espectro. Se mide en grados Kelvin, según una norma que sitúa en 5.500 ºK la luz del día teóricamente perfecta. Para días nublados, la temperatura del color sube (se produce una dominancia del azul) hasta los 12.000 ºK, mientras que en el interior de una casa con iluminación artificial esa temperatura baja a unos 2.500 ºK, con una dominancia del rojo.

grano, no será proporcional en toda la imagen, sino que se manifestará de forma más evidente en las zonas oscuras. El ruido se manifiesta más en algunos canales que en otros, normalmente el canal azul suele ser el que contiene más ruido, se puede editar este canal posteriormente con algún programa de edición para reducir el ruido mediante una aplicación de filtros.

2.8.3 Corrección color entre panoramas

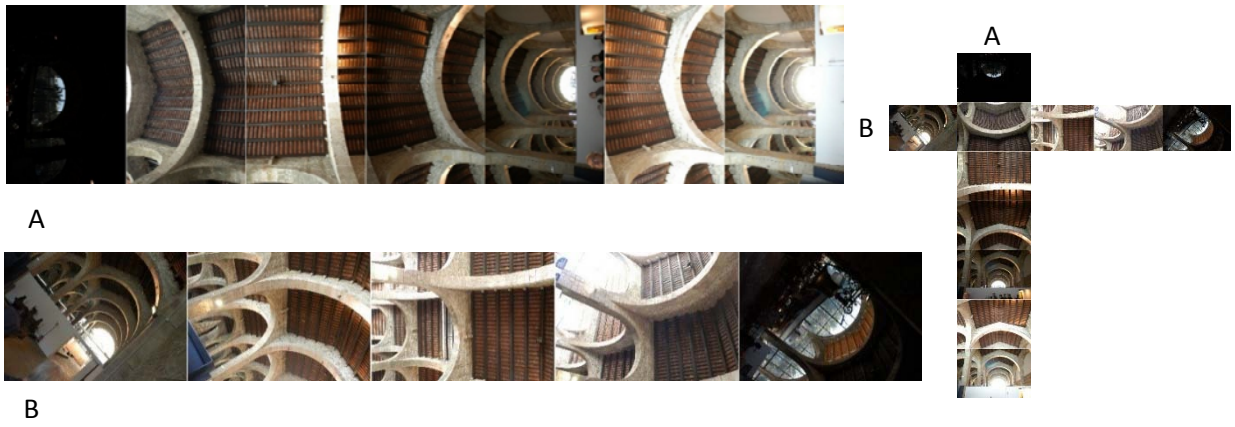
La unión entre posiciones TLS implica que la información de color entre panoramas se mezcle, en este proceso destacan os siguientes aspectos:

- **Color relación a la distancia.** El color de la fotografía cambia con la distancia y al unir posiciones distantes, en algunos casos el color se ve tan alterado que no se puede igualar con las posiciones más cercanas, debido a la profundidad de campo y factores ambientales.
- **Fotografías en relación a la hora del día y balance del blanco.** Al unir posiciones de diferentes horas o diferentes días, cambia el valor tonal de la fotografía, sumado a ello la cantidad de fotos adquiridas limita el realizar un control del color de la fotografía (balance del blanco), por lo cual se debe tomar un panorama como referencia e igualar el color de los demás en base a este. Se debe limitar cruzar panoramas distantes ya que se dificulta la homogeneidad del color.
- **Cambio de la fuente de iluminación.** Entre posiciones las fuentes de luz cambian, en los perores de los casos generando desde panoramas a contra luz hasta panoramas con sobreexposición, en los cuales se da cierta pérdida de información que no se puede recuperar, obligando a eliminar estas zonas en las nubes de puntos, ya que una posición mal registrada puede deteriorar la definición de otras posiciones.
- **Paralelaje.** Las diferencias de correspondencia entre el censor de la cámara y la del escáner, cuando estos no están integrados es más evidente en interiores, ya que elementos cercanos se pueden proyectar a zonas lejanas, por la diferencia en la posición de los censores y porque la cámara toma los datos con un mayor punto de fuga que el escáner, por lo cual se tiene que tener en cuenta los elementos lejanos y cercanos en la decisión de determinar la posición de escaneo. En el caso del RIEGL z420i la altura a la que se encuentra la cámara aumenta la visibilidad de este paralelaje, cuando se escanean objetos más cercanos a la cámara que al escáner.
- **Interiores en relación a exteriores y el HDR.** Existen problemas de adaptación a la luz en lugares oscuros, que se tienen que conectar con zonas exteriores al unir posiciones. Para solucionar este problema se utiliza la técnica de renderizado de alto rango dinámico HDR (*High Dynamic Range Rendering),* es una tecnología de renderizado que busca imitar el funcionamiento de la pupila del ojo, al consigue iluminar correctamente todas las zonas de una fotografía aunque estas contengan diferentes luminosidades, ya que el ojo al adaptarse de forma continua a las diferentes iluminaciones permite que el celebro adapte esta información, lo cual no es posible directamente con las máquinas fotográficas en la actualidad, ya que la capacidad de adaptación que tienen está basada en el fotómetro (medidor de luz), por lo cual esta homogenización de iluminación tiene que realizarse en laboratorio, como en el ejemplo de la Ilustración 22.
- **Promedio en el cálculo de la iluminación en el panorama.** En algunos casos en los que la cámara está integrada en el TLS hay opciones de captura especializados, en el caso de los escáneres Faro (a partir del faro scene 5.1), se puede escoger tres opciones de medición en relación a la exposición de la cámara, estos parámetros son medición ponderada promedio, medición ponderada de la horizontal, medición ponderada zenit. Estos valores deben cambia en relación a las fuentes de luz, en la Ilustración 23 se muestra una exposición al zenit, la cual

incluyo en el promedio de cálculo la iluminación de la lámpara, que oscureció la toma de las datos, en este caso debió utilizarse una medición horizontal, la cual promedia dos puntos a 180 grados para dicho calculo.

- **Edición por foto o por panorama generado.** El número de fotografías que adquieren los escáneres puede ser elevado, el Faro Focus^{3D} recoge 84 fotografías por posición, lo cual limita una adecuada edición de las fotografías en programas especializados, por el número de fotos y por el área que cubre cada foto. En estos casos se recomienda editar directamente el panorama (Ilustración 23), en primer lugar aplicando las fotos adquiridas sobre la nube, luego exportando el panorama que este proceso genera como una imagen *JPEG .jpg, Bitmap .bmp, o Portable Network Graphics .png (export color overlay*), el panorama se edita en programas de fotografía. Posterior a la edición se reimporta en el programa del escáner en este caso *Faro scene (remplace color overley)*.

Ilustración 22: Relación entre fotos de panoramas HDRI sin editar (entradas de luz distantes). Escaneo al techo y escáner en 45 grados. Museo Marítimo de Barcelona, naves medievales.



Fuente: Propia

Ilustración 23: Panorama del Faro Focus^{3D}, error de ponderación de la exposición afectada por la luz de la lámpara (medición zenit). Levantamiento de la exposición micro coches MUHBA

Fuente: Propia

2.8.4 Proyección fotográfica a una nube de puntos

En los casos que se tenga que repetir la adquisición del color, sin conocer la posición relativa de los censores, se puede proyectar esta información en base a puntos de control. Diversos autores plantean estrategias para proyectar imágenes fotográficas a modelos de nubes de puntos (ABDELHAFIZ 2009), (BUJAKIEWICZ, PODLASIAK y ZAWIESKA 2011).

La Ilustración 24 muestra un ejemplo de proyección de una imagen fotográfica a un panorama TLS utilizando puntos de control. En este ejemplo la imagen se construyó mediante la fusión de fotografías (A), aumentando el ángulo de captura de la imagen, como en este proceso se deformaron las fotografías, la proyección necesito 50 puntos de control (B), aun así se generaron problemas de proyección (C), ya que la imagen base era un panorama proyectado en ortogonal, en comparación con el desdoblamiento TLS en base a una esfera, por ello se repitió el proceso solamente con una foto sin distorsión (E), reduciendo con ello los errores de proyección.

Ilustración 24: Proyección de un conjunto de imágenes a una nube de puntos

A *B* *C*

D *E*

Fuente: Propia

2.8.5 Transferencia de atributos entre nubes de puntos

La falta de homogeneidad del color o intensidad entre nubes se puede reducir mediante filtros, que igualan estos valores entre nubes alineadas, en la etapa de post proceso de la nube de puntos, uno de estos filtros es *vertex attribute transfer*[29], el cual es usado entre mallas o vértices de mallas.

Estos filtros se aplican generalmente en mallas, pero pueden ser utilizados en **nube de puntos con una adecuada estructura**, conservando la **relación de los puntos en el proceso de escaneo**, ello se puede conseguir al exportar la nube conservando este valor, como con el formato *PTX*, luego en el programa utilizado para la transferencia de atributos únicamente importar los puntos y el color, de lo contrario se importara una malla de la triangulación de los puntos en relación a la continuidad de estos en el escaneo esférico (siempre y cuando se requiera trabajar desde los puntos). La relación de los puntos se puede conseguir realizando un búfer de los puntos (CIGNONI 2008), logrando conocer la conexión que tienen unos a otros, siendo un proceso no recomendado, ya que la información de relación entre los puntos está en la base de datos de partida.

La transferencia consiste en pasar los atributos de un objeto a otro, en este proceso se transfieren atributos de diferentes representaciones de un mismo objeto (Ilustración 25). El valor se traslada de cada vértice de la malla (o nube de puntos estructurada) al punto más cercano (no vértice) en la superficie de la malla que se está calculando. El cálculo asume que los objetos son similares y están alineados.

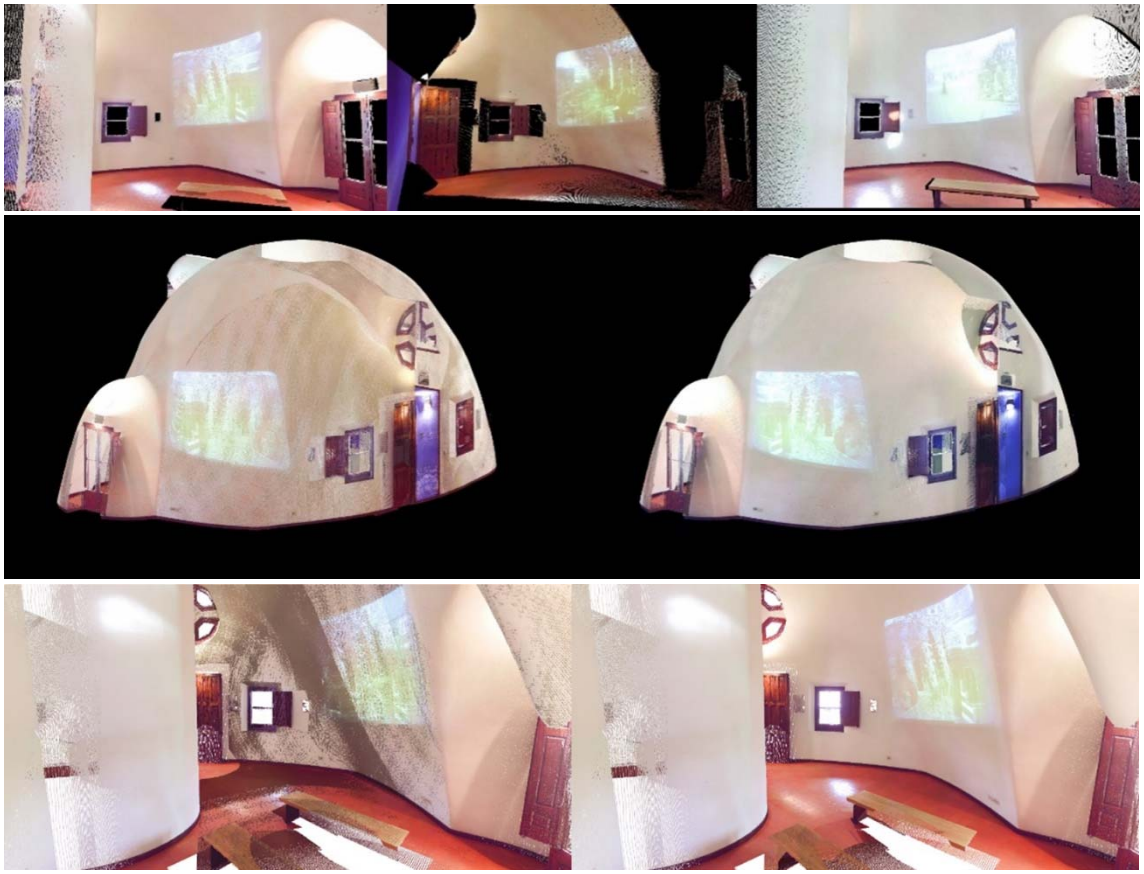
La transferencia de información puede generarse en:

- **Transferir geometría:** La posición de cada vértice de la malla se traslada a la posición del punto más cercano correspondiente de la malla de referencia.
- **Transferencia de la normal:** La normal de cada vértice de la malla obtiene la normal correspondiente al punto más próximo de la malla de origen, por interpolación.
- **Transferencia del Color:** El color de cada vértice de la malla obtiene el color correspondiente al punto más próximo de la malla de origen, Ilustración 25.
- **Transferencia de cualidad:** La cualidad se refiere a la probabilidad de que los vértices provengan del ruido de la toma de datos o de errores en la construcción de la malla, desde la nube de puntos también se puede almacenar este dato como un valor contenido en la nube. La transferencia de esta información parte del mismo principio de proximidad de los procesos anteriormente mencionados.
- **Transferencia de una selección:** Este proceso puede ser de gran utilidad, ya que se pueden aplicar procesos sobre nubes de puntos filtradas y luego pasar la selección de dicho proceso a la malla original, ejemplo de ello pude ser la clasificación de una nube de puntos con los procesos RANSAC explicados en el capítulo 3, aislando un plano y luego pasar esa selección a la nube de puntos completa. El proceso de transferencia de selección parte del mismo principio de proximidad de los procesos anteriormente mencionados.
- **Almacenar distancia como calidad de la malla:** Se almacena la distancia entre las dos mallas como el valor de calidad de la malla.

[29] Diversos programas de fuente abierta permiten estos procesos, como lo es: Meshlab, *point cloud library*, este proceso también existe en programas de modelado de mallas de alta resolución como lo son maya de autodesk o zbrush, teniendo la limitante de necesitar mallas para realizar el proceso.

La distancia como calidad entre mallas se puede extraer en paralelo a uno de los procesos descritos anteriormente, ayudando a visualizar errores de proyección de una información a un plano que no esté contemplado en las dos posiciones, entendiendo que el valor que se asigna es el del punto más próximo con un rango de tolerancia predefinido por el usuario, si este valor es muy grande por ejemplo puede trasladarse el valor de un lado de una puerta a los puntos que dan al lateral de la puerta. Los valores de tolerancia utilizados en la ilustración 15 son: 0.005 unidades en la escala del proyecto y 0.036 como porcentaje de tolerancia, estos valores de tolerancia en Meshlab van del 0 al 14,0483%.

Ilustración 25: Transferencia del atributo de color desde Meshlab. Las imágenes superior son las tres posiciones TLS, medio y abajo la comparación entre la nube de puntos antes de aplicar el filtro de transferencia de atributos y el resultado final.



Fuente: Propia

2.8.6 Resolución de la nube de puntos

Los levantamientos TLS requieren una planeación detallada, en busca de cumplir los objetivos propuestos en cada caso de estudio, en esta planeación se establece las distancias y puntos clave en el proceso de documentación, ya que de ello depende la resolución de la nube de punto y la homogeneidad de su información. Ejemplo de ello es la Ilustración 26, en la que se combinaron escáneres lejanos con cercanos, los lejanos tienen una distribución homogénea de puntos, pero con una densidad de puntos que no permite la identificación de la escena con claridad, también se realizaron tomas muy cerca de los muros detallando una zona que carece de interés en relación a la

densidad de puntos y con una distribución de puntos que se degrada, por el ángulo de incidencia, reduciendo la densidad de puntos por la incidencia del escáner a la superficie cercana, la posición lejana se adquirió a más de 20 metros de distancia, y la cercana a 2 metros de la fachada.

Por otra parte el color y la intensidad también se ven afectadas por la distancia. En esta transición cambian factores ambientales, la profundidad de campo, al igual que factores relacionados a la forma en que los instrumentos adquieren los datos, por ejemplo la intensidad en Faro Focus^{3D} cambia a la distancia y se ve afectada por factores de luz, como la iluminación artificial, la cual sobrexpone la información de intensidad a cierta proximidad, en este escáner la intensidad se puede graduar a una distancia, escalando los valores entre un rango preestablecido, que permite una mayor homogeneidad de la información, perdiendo la información que sobrepase este rango predefinido.

Ilustración 26: Nube de puntos con posiciones identificables por la resolución y detalle de la información en color

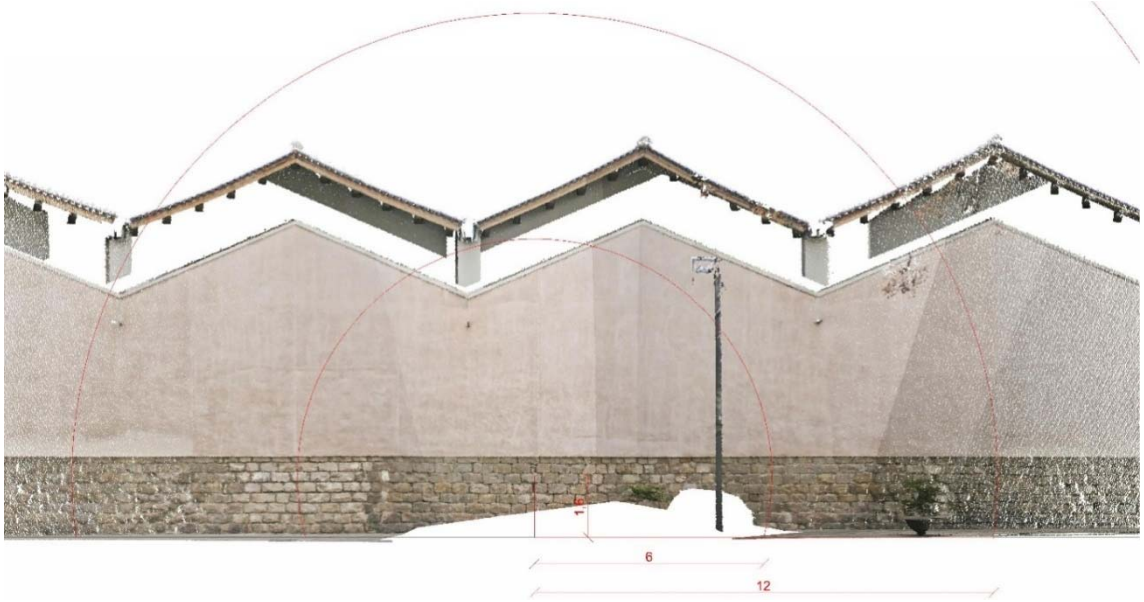
Fuente: Propia

La pérdida de resolución por el ángulo de incidencia y por la distancia al objeto escaneado se puede prever, como se muestra en la Ilustración 27 con el escáner RIEGL z420i, con un ángulo de escaneo de 0.08º, manteniendo una resolución de 1 punto por centímetro hasta los 12 metros y una resolución de 5mm hasta los 6 metros, teniendo una distancia perpendicular a la fachada de 4 metros en la toma de datos, este tipo de ejercicios permiten conocer las características de los equipos, en búsqueda resoluciones apropiadas para objetivos concretos.

La resolución del TLS cambia con cada instrumento, ejemplo el Riegl z420i en promedio adquiere dos millones de puntos en 8 minutos en comparación con los cuarenta millones que adquiere el Faro Focus^{3D}, en los escáneres de triangulación este número baja en termino de miles de puntos.

También influye en la densidad de la nube de puntos es el ángulo de escaneo de cada instrumento, tanto por las limitantes del sensor láser como de la cámara, ejemplo de ello es comparar las Ilustración 28 e Ilustración 29. La primera con el Faro que adquiere igual cantidad de información fotográfica como láser, en la versión del RIEGL z420i (cámara réflex digital Nikon D100) genera una pérdida de datos importante entre los sensores, ya que el ángulo de captura de la cámara es menor que la que adquiere el escáner. En promedio el sensor láser recoge un 25% más de información que la cámara digital, unos 2861457 puntos (Intensidad), frente al color que tiene 2149598 puntos.

Ilustración 27: Una posición TLS y la disminución de resolución a partir de la distancia, con un ángulo de escaneo de 0.08º, manteniendo una resolución de 1 punto por cm hasta los 12 metros. Museo Marítimo de Barcelona



Fuente: Propia

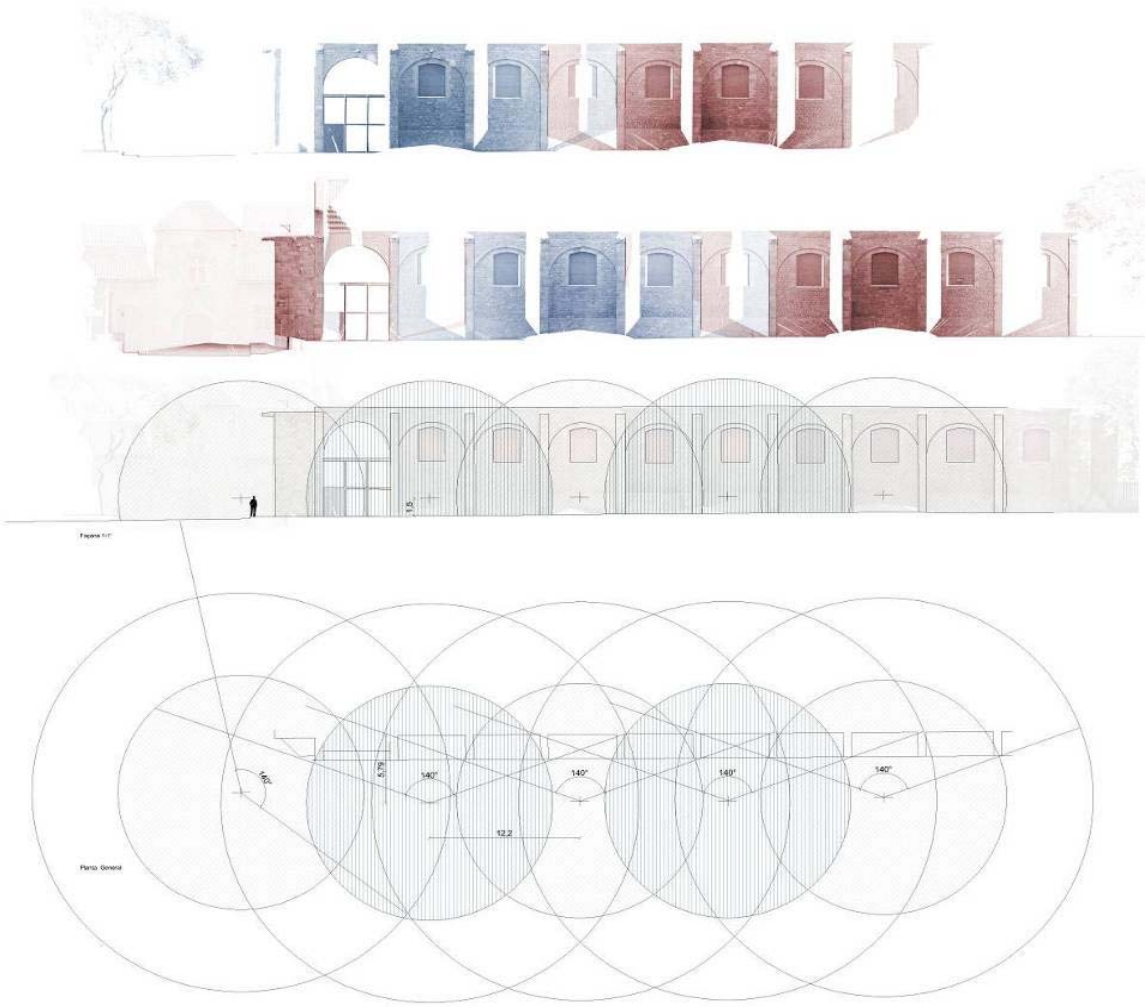
Ilustración 28: Comparación de toma de datos de intensidad y color. En planta y en el panorama. La intensidad recoge un 25% más de información que el color en promedio.

Fuente: Propia

La visibilidad a todas las superficies limita una captura total de la información a documentar, los elementos o partes de la misma superficie que obstruyen la captura de datos se consideran oclusiones. Se puede llegar a rellenar estas zonas al unir posiciones TLS, generando una nube de puntos con diferentes densidades de puntos.

Partiendo del principio de que las nubes homogéneas permiten una mejor lectura de los levantamientos en 3D, se plantean dos caminos para conseguirla, el primero es filtrar la nube de puntos a una distancia específica, perdiendo resolución en zonas cercanas a la posición TLS, pero optimizando el modelo. Por otra parte se puede realizar un proceso de escaneo sectorizado, que reduzca las oclusiones y al mismo tiempo traduzca el traslape entre escáneres.

Ilustración 29: Minimizar el traslape entre posiciones TLS, mediante la sectorización en la toma de datos, evitando relacionar información de color entre panoramas



Fuente: Propia

Ejemplo de ello es el levantamiento del Museo Marítimo de Barcelona, realizado por el Laboratorio de Modelización Virtual de la Ciudad (LMVC 2012), comprende un proceso de escaneo doble, con dos resoluciones y ángulos de captura por posición, permitiendo por una parte una unión entre posiciones mediante el proceso ICP (*Iterative Closest Point* capítulo 2.7.2), y por otra reducir el traslape mediante la zonificación en el proceso de toma de datos. La primera toma utilizada para la unión entre posiciones, se considerada de baja resolución y realiza con un panoramas de 360ºx80º con un ángulo de 0.2º, el segunda toma de datos, considerada de alta resolución, reduciendo el traslape entre posiciones, mediante la selección de regiones o zonas en el primer panorama, en el

caso de exteriores se utilizó un ángulo de escaneo específico, de 90ºx80º y una resolución angular de 0.08º.

El modelo de baja resolución permitió unir en este caso un modelo muy complejo de 520 posiciones TLS, y el modelo de alta resolución, que utilizo las mismas operaciones de traslación y rotación de la unión del modelo de alta resolución, permitió obtener una nube de puntos más homogénea, y a su vez facilito la captura fotográfica al permitir sectorizar zonas en zonas complejas como las naves medievales (MARAMBIO, CORSO y GARCÍA-ALMIRALL, Museo Marítimo de Drassanes: levantamiento con Escáner Láser Terrestre, planimetría y modelo 3D. 2011). Esta sectorización del proceso de escaneo permitió a su vez corregir el error generado por la diferencia de posición entre el sensor de la cámara y el del escáner, evitando los elementos cercanos y con ello reducir los errores de paralaje y se enfatizó la toma de datos de los elementos del edificio, como muros, arcos y techo, reduciendo al mínimo la afectación de los visitantes del museo como elementos ajenos al edificio, facilitando a su vez la eliminación de la información no deseada en las nubes de puntos.

Capítulo 3. CLASIFICACIÓN DE ENTORNOS COMPLEJOS

3.1 Concepto de levantamiento arquitectónico

El concepto de levantamiento arquitectónico no se debe reducir solo a una vinculación de las disciplinas técnicas de arquitectura y de topografía, al ser la base fundamental que permite el extenso conocimiento del patrimonio, vincula aún más disciplinas, como la arqueología, historiadores del arte, o incluso a todo lo relacionado con la construcción. El levantamiento arquitectónico tiene como tarea primordial el integrar el conocimiento de un objeto arquitectónico, no solo en su materia física, sino también todo lo concerniente a su historia y su significado (A. ALMAGRO 2004).

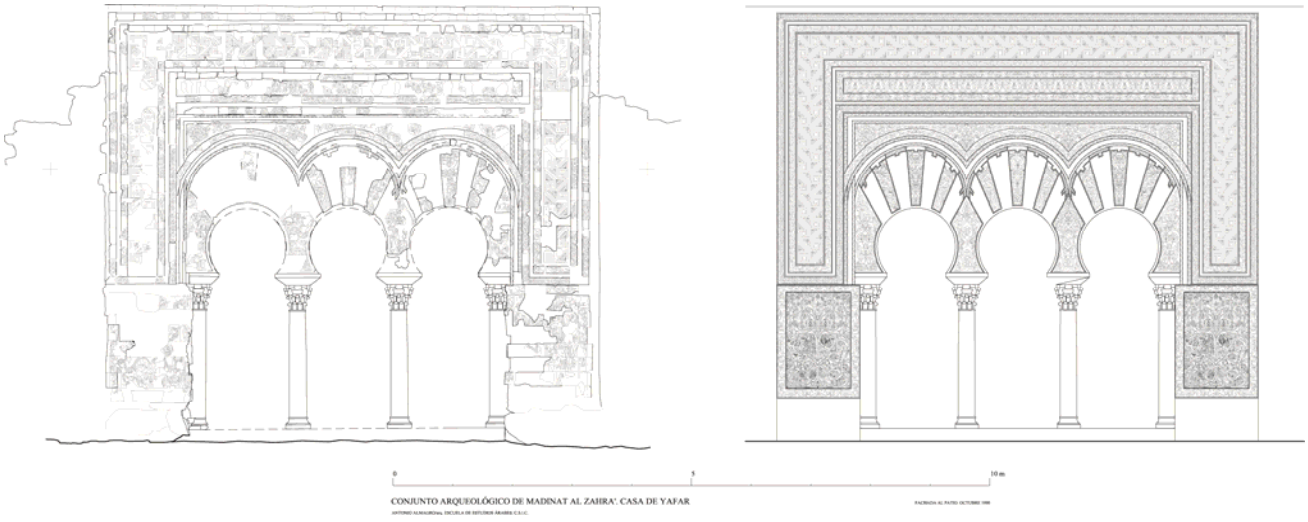
Se llega a considerar el levantamiento como un proceso contrario al de proyección arquitectónica (CRAMER 1986), entendiendo que los proyectos arquitectónicos parten del diseño del esbozo de las ideas, hasta la determinación de los materiales, en este proceso se genera un material documental, de planos, de secciones, de alzados, de detalles y de croquis especiales, que permiten la concepción del edificio y su construcción, normalmente se realizan cambios en la misma obra, se actualizan zonas de los proyectos. Posterior a esta proyección, nuevas generaciones de arquitectos y especialistas también intervendrán en ellos, se modifican los proyectos, se amplían, se transforman, se reconstruirán, ect. En algunos de estos casos se le dará un valor patrimonial a estos edificios y se requerirá un mayor rigor en su documentación.

Cuando los edificios son de interés patrimonial, el levantamiento adquiere otro matiz, como proceso inverso al diseño del edificio, se busca entender los factores que lo hacen lo que es, se analizan sus orígenes y se recapitula sus características. Ejemplo de ello es la Ilustración 30, como punto de partida documental para analizar el patrimonio desde diferentes ángulos, desde comprender todas las transformaciones, entender los sistemas constructivos, los materiales registrados, llegando a estudiar la configuración de factores de carácter artesanal, lo cual requiere un registro preciso del levantamiento. Por ello se entiende que:

> *“el levantamiento no es un simple trabajo de medición y representación, sino una rigurosa tarea destinada a la profunda comprensión del objeto arquitectónico y a la formación de la visión crítica y personal: razón y emoción deben entrar en juego, ya que el cometido del dibujante no es sólo el de representar de forma sistemática o mecánica (como una máquina): el análisis y la síntesis gráfica no pueden prescindir de las intenciones del autor”*
>
> (GÁMIZ 2003).

Así, el levantamiento resulta esencial para el conocimiento riguroso de la realidad arquitectónica, y además sirve para recopilar, organizar y suministrar información objetiva. Y al mismo tiempo se considera un proceso, ya que pasa por etapas que lo definen, por ejemplo desde la toma de datos hasta el dibujo final. En este caso se hace referencia a un discurso gráfico, tiene distintos modos de expresión y abstracción, familiarizados con la escala.

Ilustración 30: Levantamiento de Madinat Al-Zahra[30]. Casa de Yafar, estado actual y teórico



Fuente: (A. ALMAGRO 2011)

Diversos autores consideran que el levantamiento está constituido por tres etapas, en términos generales se refieren a una aproximación a la arquitectura en la que **analizan**, se **identifican** y se **sintetizan** algunos de sus episodios mediante **operaciones graficas objetivas, rigurosas y eficaces**, en relación con las intenciones o fines propuestos. En la publicación de (SAINZ, El dibujo de levantamiento: un instrumento gráfico para la investigación arquitectónica 1991) se resumen algunas definiciones de levantamiento arquitectónico, en la publicación de (GÁMIZ 2003) destacan dos puntos de vista clásicos, el de *Docci - Maestri* y *Vagnetti*, según *Docci y Maestri "el levantamiento es análisis, selección y síntesis del hecho real"* y *Vagnetti* define el levantamiento arquitectónico como: "cualquier representación documental de la arquitectura, realizada como operación sucesiva a la del reconocimiento y a la observación de la propia arquitectura, y traducida a término gráficos de cualquier grado de fidelidad".

Según (A. ALMAGRO 2004) un levantamiento arquitectónico debe permitir:

1. El conocimiento de su definición morfológica, dimensional del objeto, de forma fiable, precisa y critica
2. El conocimiento, preciso, fiable y crítico de la conformación morfológica y dimensional del objeto, en su estado actual.
3. Posibilidad de una ágil edición temática de la planimetría del levantamiento, en relación al conocimiento de este de forma global.
4. Observaciones históricas documentadas u obtenidas del objeto, mediante una comprensión crítica.

[30] La llamada casa de Ŷafar es otra notable vivienda del alcázar que también cuenta con un patio sobre el que recae una fachada ricamente ornamentada. Tras ella hay una sala pórtico con otra dispuesta perpendicularmente y flanqueada por otras dos paralelas a modo de alcobas.

3.1.1 El análisis de la arquitectura

El análisis de la arquitectura es un tema complejo, difícilmente abordable en una única tesis. En consecuencia de ello, en este apartado se plantea la necesidad de tener un enfoque general, sobre los conceptos relacionados con el análisis de los edificios, por consiguiente los temas que se tratan a continuación requerirán investigaciones exhaustivas, al igual que las citas tratadas. Los temas tratados son de gran interés y facilitan tener una visión global de tema en cuestión, sin pretender entrar en problemáticas específicas, al mencionar ciertas o bases conceptuales. De entre las cuales partimos de definiciones básicas.

Definiciones de análisis en arquitectura:

- Según la real academia de la lengua*: "Distinción y separación de las partes de un todo hasta llegar a conocer sus principios o elementos".*
- Javier Seguí (SEGUÍ 1996) considera que el *"análisis quiere decir destrucción y separación de las partes de un todo hasta llegar a conocer sus principios y elementos; examen que se hace a una obra, de un escrito o de cualquier realidad susceptible de estudio intelectual; etc. El análisis sólo tiene sentido cuando se busca interpretativamente algo respeto al objeto o la obra que se analiza. Analizar una obra es someterla a ciertas hipótesis acerca de su naturaleza y aplicar los instrumentos idóneos para probar si se cumplen".*
- Jorge Sainz (SAINZ, El dibujo de arquitectura 1990) plantea que *"el análisis es siempre un proceso de reducción que trata de estudiar un aspecto prescindiendo temporalmente de los demás, pero cuyo objetivo final es siempre la mejor comprensión del objeto analizado, entendiendo este como una unidad invisible"*
- José Parra (PARRA 2001) plantea una aproximación teórica al concepto del análisis en términos generales. *"En cuanto a metodología y a estrategia intelectual que intenta alcanzar un determinado conocimiento sobre el objeto al que dedica su atención. Conocer es su fin último y, en función de este objetivo, se establecerán los métodos y se utilizaran los recursos –procedimientos e instrumentos- más eficaces."*
- José María Jiménez (J. JIMÉNEZ 1997) realiza un recorrido critico por diversos planteamientos analíticos en busca de una visión integral equilibrada, considerando que para ver no siempre es necesario un solo esquema. *"Se hace flaco favor al conocimiento de una arquitectura concreta si se la ve sólo desde una angulación específica. No significa esto que se niegue que la aproximación unilateral a una obra no tenga interés propio. Lo que se plantea es que se puede aspirar a la determinación de una mayor profundidad de lectura"*

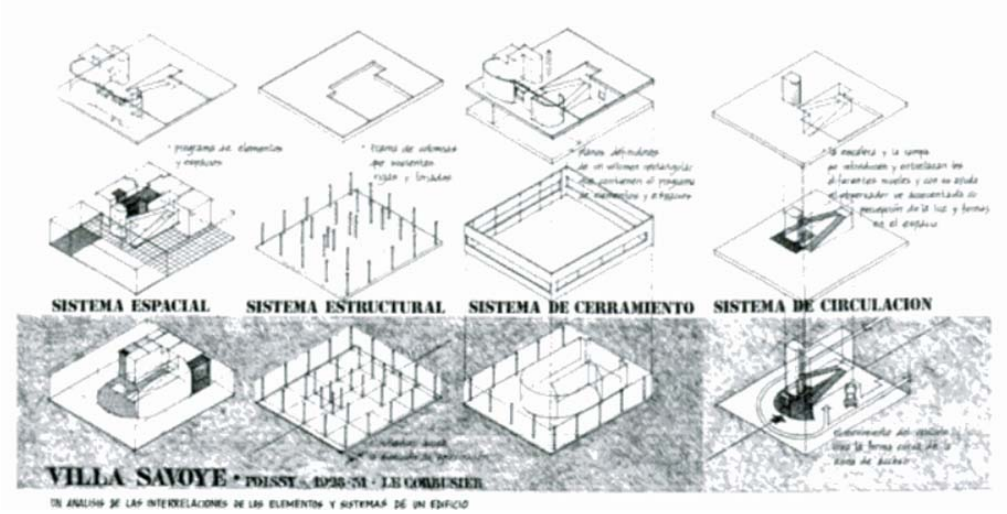
Muchos otros autores tratan esta definición en relación a la arquitectura, pero en general se puede entender el análisis de la arquitectura como: un proceso de progresión del conocimiento, en relación a objetivos concretos, con enfoques y recursos específicos, como una aproximación tanto teórica como gráfica, orientada al modelo analizado.

La contextualización del concepto arquitectura también nos ayuda a entender el análisis los análisis que se han realizado en ella, entendiendo la gran variedad de contextos en la que se puede utilizar, y los factores temporales que afecta su entendimiento, siendo de gran interés en la historia los siguientes (GÁMIZ 2003):

- Vitrubio identifica cualidades básicas *firmitas, utilitas y venustas*, estas han sido entendidas a través de los siglos con innumerables matices, como por ejemplo estabilidad, comodidad y deleite según Alberti.
- Claude Perrault añadiría Solidez, comodidad, belleza, ordenación, proporción, decoro y economía.
- Norberg Schulz distingue tres dimensiones técnica, formal y funcional (Estructura, función y forma) y categorías formales (masa, espacio, superficie), identificando masa y espacio como manifestación sensible del concepto objeto-contexto o figura-fondo.

Hoy en día este concepto se amplía, al incluir factores como: el protagonismo del lugar, el programa, el presupuesto, la historia, la escala, geometría, la proporción, entre otros muchos aspectos que abarca la arquitectura, en un mundo abierto, cambiante, que tratamos de conocer y ordenar de forma continua. Alrededor de esta idea de búsqueda de desarrollo del conocimiento, se suelen realizar ciertos análisis sobre distintos aspectos concretos, que sean representativos a la obra y sus circunstancias, ejemplo de ello la Ilustración 31.

Ilustración 31: Análisis de interrelaciones de elementos y sistemas de la villa Savoye (le Corbusier, 1928-1931)



Fuente: (CHING 2005)

Estas ideas pueden servir como base de lecturas analíticas parciales, sobre la arquitectura. En el ejercicio práctico de la actividad analítica, los enfoques pueden especializarse tanto como sea necesario, en relación a los objetivos propuestos. Algunos de estos análisis se pueden clasificar en:

- **Análisis funcional**: Parte de la necesidad del uso y desarrollo de las actividades y su programa.
- **Análisis constructivo:** Se centra en aspectos técnicos, que dar respuesta a factores culturales, ambientales, mediante sistemas constructivos en evolución.
- **Análisis volumétrico:** Se busca comprender la plasticidad de la arquitectura, de los volúmenes que la componen, mediante operaciones formales.
- **Análisis espacial:** Busca entender la relación de llenos y vacíos de la arquitectura, en relación a las posibilidades que dan los espacios para organizar actividades concretas.

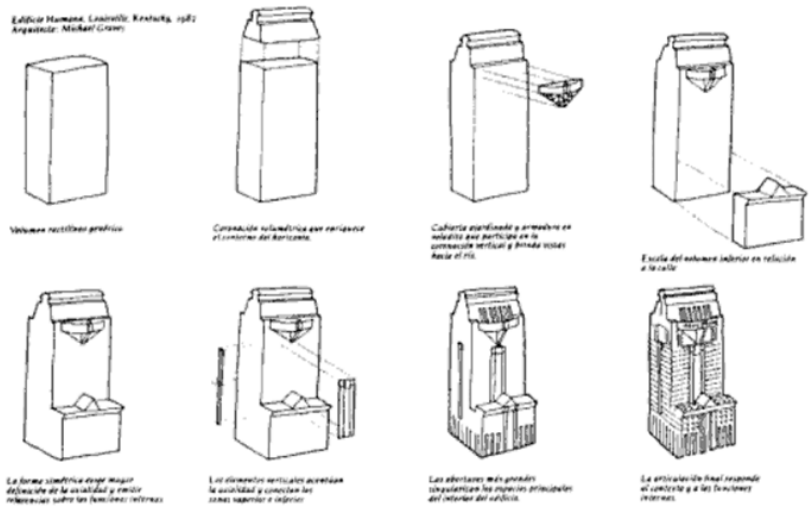
- **Análisis urbano o paisajístico:** Se entiende como el análisis de la transformación del paisaje natural por el hombre, como modificación colectiva en relación a la habitabilidad de la comunidad.
- **Análisis documental:** Se estudia de forma crítica diferentes tipos de documentación, desde gráfica, escrita, audiovisual, etc., en busca de un mayor entendimiento del objeto arquitectónico.

Estos análisis poseen un cierto grado de subjetividad, ya que no se puede conocer un proyecto en su totalidad, al involucrar factores más grandes que el mismo proyecto, como el contexto, la historia, entre otros, por ello, el análisis de un edificio patrimonial tiende a ser parcial, por lo que deben considerarse criterios que hagan que el análisis resulte más coherente y riguroso, en relación a los objetivos planteados, en el proceso de lectura intencionada del proyecto.

Esta parcialidad puede ser gestionada con estudios intermedios, que aporten nuevos conocimientos o ideas del proyecto, como partes relacionadas, que den respuesta a la complejidad del proyecto analizado. Para (NORBERG-SCHULZ 1998) *"el proceso analítico debe ir del todo a las partes, y viceversa, una y otra vez…."*, entendiendo *que "al operar analíticamente sobre la arquitectura resulta fundamental la adecuada elección de enfoques o sistemas autónomos cuya superposición puede conducir a un sistema total"*. Lo anterior refuerza el argumento de que el análisis de partes o factores del edificio tienen una relación con la creación de nuevos esquemas de conocimiento, y no debe considerarse como una simple tarea de clasificación, que impida relacionar la nueva información aportada por un análisis, algunos autores plantean la diferencia entre descomposición a disección, como ejemplificación de este planteamiento.

La definición de selección refuerza esta idea, ya que se basa en la percepción del mundo que nos rodea, comienza con la recepción de la información del medio en el que se vive, a través de un proceso de discriminación, permitiendo la clasificación y comparación de dicha información, a diferentes escalas y niveles de profundidad (Ilustración 32).

Ilustración 32: Génesis y articulación del volumen del edificio Humana (Louisville, Kentuchy), Michael Graves, 1982



Fuente: (BAKER 2000)

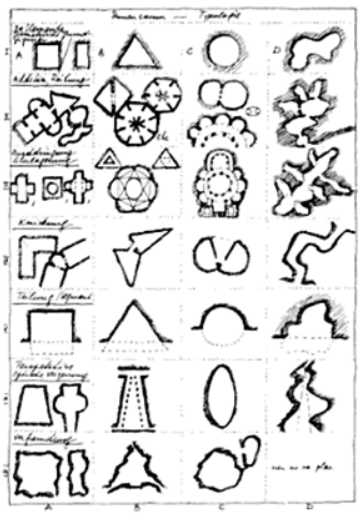
3.1.2 La clasificación en arquitectura

La clasificación en arquitectura se desarrolló especialmente a partir del siglo XVIII y durante el XIX, particularmente en Francia, obras teóricas sobre arquitectura que usaban tablas comparativas como base de sus argumentos. En el siglo XX, Ernst Neufert (NEUFERT 2014, primera edición en Alemán 1936) propone clasificaciones de gran interés utilitario, otros trabajos como el de Alexander Klein cobran especial interés en los estándares de la vivienda mínima, también se realizan trabajos de clasificación para operar la ciudad, como los que por ponen (ROSSI 1999) y (GRASSI 1973).

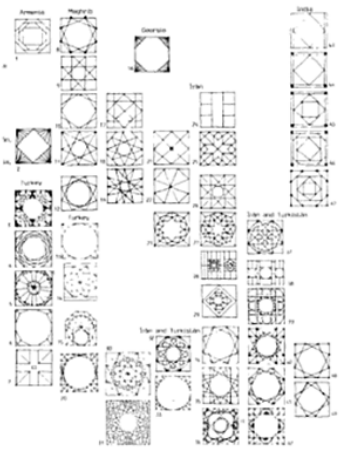
Es evidente que el arquitecto le interese la clasificación en diversas tendencias, enfatizando en las relaciones de los elementos que lo comprenden y a los cuales interactúan con este, entre estas conexiones encontramos las mencionadas por (J. JIMÉNEZ 1997): *"sus planeamientos espaciales, sus organizaciones volumétricas, sus particulares formas de dinamismo y expresión empática, sus tratamientos de la luz, sus diálogos con el entorno, el suelo y el cielo, las formas de acceder y circular por ellos, las distintas formas en que se puede interpretar sus respectivas génesis formales. Comprender cómo sus diferencias responden a importantes cambios en las percepciones del mundo, del espacio y de la arquitectura y, también, a diferentes medios de control formal".*

Diversos autores como (ROSSI 1999) profundizan en esta clasificación - relación, llegando a plantear el concepto del tipo, *"la palabra tipo o representa tanto la imagen de una cosa que copiar o que imitar perfectamente cuanto la idea de un elemento que debe servir de regla al modelo"*, en otras palabras no es un modelo que puede repetirse, sino la concepción de obras que se asemejan entre sí (Ilustración 33).

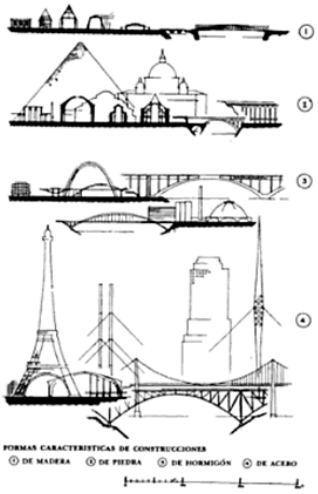
Ilustración 33: Ejemplos de clasificación de tipologías



RobKrier, tipos de espacios interiores



A. M. Prochazka, trazado de techumbres islámicas



PhiliphBoudon, escala de construcciones según materiales

Fuente: (GÁMIZ 2003)

Los conceptos de tipo y clasificación en arquitectura se han desarrollado por diferentes autores y todavía continua la discusión en torno a ello, según (ROSSI 1999) *"En todas partes el arte de fabricar regularmente ha nacido de un germen preexistente. En todo es necesario un antecedente; nada en ningún género viene de la nada y esto no puede dejar de aplicarse a todas las invenciones de los hombres".* Según Rossi el tipo se relaciona con la investigación de los orígenes del bien analizado:

“Por ello nos han llegado mil cosas de todos los géneros, y una de las principales ocupaciones de la ciencia y la filosofía para captar su razón de ser es investigar su origen y su causa primitiva. Eso es a lo que hay que llamar tipo en arquitectura, como en cualquier otra rama de las invenciones y de las instituciones humanas”. Rossi plantea que *”no es posible captar de inmediato la estructura de una cosa o la `cosa misma´ mediante la contemplación o mera reflexión. Para ello es precisa una determinada actividad. No se puede penetrar en la `cosa misma´ y responder a la pregunta de qué es `la cosa en sí misma´ sin realizar un análisis de la actividad gracias a la cual es comprendida la cosa, con la particularidad de que este análisis de abarcar el problema de la creación de la actividad que abre el acceso a las `cosas misma´. Esta actividad son los aspectos o modos diversos de la apropiación humana del mundo”.*

3.1.3 Las partes y el todo

La arquitectura relaciona diferentes disciplinas que convergen en el proyecto arquitectónico, no se explica por la suma de sus propiedades o procesos si se toman aisladamente, se debe tomar conciencia del conjunto de estos y de las relaciones que los ligan. De ello surge la pregunta, ¿cómo debe entenderse la relación la información de un edificio patrimonial?

Aunque es de especial interés identificar ciertos episodios y niveles formales, otra operación que permite avanzar en el conocimiento consiste en establecer relaciones entre ellos, en procesos decompositivos coherentes (J. JIMÉNEZ 1997). La relación entre elementos se vincula a los conceptos básicos de las teorías arquitectónicas, se llega a plantear que *“lo específico de la arquitectura es el modo de poner en relación entre si las diferentes estructuras que confluyen en ellas. No sin razón es este el problema de las teorías arquitectónicas, desde Vitrubio a toda la tratadística del ochocientos”* (TAUFURI 1968).

Se llega a plantear que la descomposición y la relación de las partes es inherente al proceso creativo, permite comprender y analizar las características propias de una obra o el contexto en el que se ubica. Se considera una herramienta para el aprendizaje, en relación a un entendimiento crítico del elemento que se estudia. Según (GÁMIZ 2003) *“Otra forma de conocimiento analítico ampliamente contrastada en la práctica arquitectónica, se basa en la consideración de lo simple y lo compuesto, en la descomposición de fenómenos en partes menores (sin disecar, ni quitar la vida al organismo estudiado) de manera que la comprensión de dichas partes y se sus relaciones puede servir para entender mejor su conjunto”*.

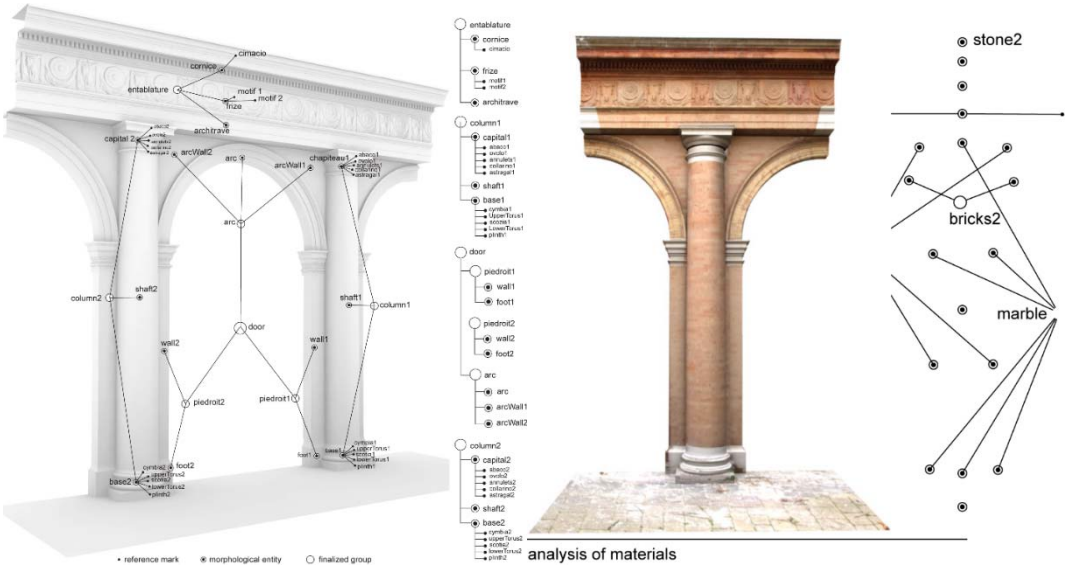
Así, mediante la descomposición en problemas menores y a través de la manifestación de sus relaciones, se puede completar un proceso analítico, para (J. JIMÉNEZ 1997) *“la arquitectura no es explicable por la suma de las propiedades y naturaleza de los procesos de sus componentes, si éstos se toman aisladamente, ya que es necesario tomar en consideración el conjunto de éstos y de las relaciones que los ligan”,* también plantea que *“la iteración permite partir de una situación formalmente compleja, para alcanzar unos niveles de suficiente simplicidad"*.

Complementario a este interés, en la actualidad hay una tendencia hacia la descripción de los componentes de detalles arquitectónicos, especialmente en el campo de *Computer Vision*, a partir de la descripción semántica de la morfología de edificios o elementos patrimoniales, ejemplo de ello son los trabajos de (DE LUCA 2008), (APOLLONIO, GAIANI y BENEDETTI 2012), en los cuales se estructura y agrupa las partes de elementos en función de la escala, características constructivas,

como análisis modular, análisis de orden, análisis de material y análisis de esculturas, como ejemplifica la Ilustración 34.

Es necesario que esta tendencia se aproxime a una estructura que permita la relación no solo en término de manejo de la información, sino como una herramienta de contextualización de factores específicos, que den a conocer más información del elemento arquitectónico, en especial si tiene un valor patrimonial.

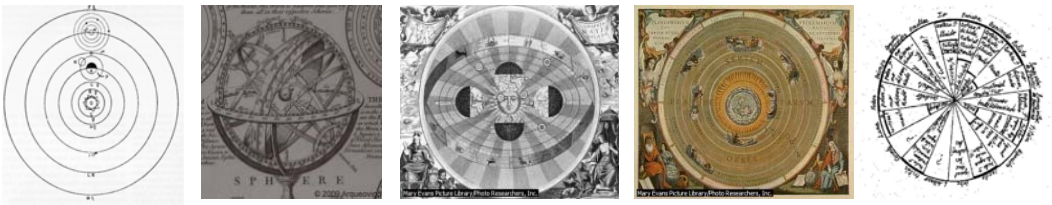
Ilustración 34: Descripción semántica de la morfología y material en una estructura de árbol



Fuente: (DE LUCA 2008)

Esta relación se conoce también como sistema generativo, (ALEXANDER 1980) lo define como *"un conjunto de partes (o elementos) más unas reglas con las que se combinarán para formar <<cosas>> admisibles".* Alexander aclara que este sistema no se debe entender como análisis individuales, *"No es una visión de una cosa única, sino el conjunto de sus partes con normas que regulan el modo en que estas partes pueden combinarse".* Estas relaciones se ejemplifican en la (Ilustración 35).

Ilustración 35: Sistema generativo



"un conjunto de partes (o elementos) más unas reglas con las que se combinarán para formar <<cosas>>

Fuente: (ALEXANDER 1980)

Para (ALEXANDER 1980) este sistema es una herramienta, no es el análisis en sí*, "La idea de sistema no ayuda más que a entender tipos de comportamiento que resultan de interacciones entre parte",* aclara que *"No debemos entender la palabra sistema para designar un objeto. Un sistema es*

una abstracción. No es un tipo especial de objeto sino un modo especial de considerar este objeto." En esta interpretación de la relación de las partes se tiene en cuenta las relaciones formales en tres dimensiones, entendidas como espaciales, puesto que los elementos son principalmente masas y espacios.

3.2 Estado del arte clasificación TLS

En los últimos años se han propuesto numerosos métodos de clasificación, la mayoría de estos se han desarrollado inicialmente con datos LiDAR aéreos, estos se adquieren en 2.5D, lo que da la posibilidad de transformarlos en la imagen (MASAHARU y HASEGAWA 2000), sin correr el riesgo de una pérdida significativa de la información (GEIBEL y STILLA 2002). Estos procesos son muy conocidos en el campo de procesamiento de imágenes, en particular en el campo de la teledetección por satélite, siendo un paso importante en el procesamiento y análisis de los datos láser.

Estos procesos de clasificación parten de la separación y organización de los objetos en una escena, con características "homogéneas" en las nubes de puntos, con respecto a una serie de criterios (DEVEAU 2006). En el procesamiento de imágenes, este criterio de homogeneidad se puede relacionar con la radiometría de la imagen.

A diferencia de los procesos de clasificación LiDAR, la nube de puntos obtenida por el escáner láser terrestre se adquiere en 3D (VOSSELMAN, GORTE, y otros 2004) , por ello la homogeneidad se refiere generalmente a la posición de los puntos en 3D. Un criterio de homogeneidad bien podría ser la curvatura o las formas planas descritas por un conjunto de puntos. La conversión de estas nubes de puntos en una cuadrícula 2D (AXELSSON 1999), podría causar una gran pérdida de información espacial (GAMBA y CASELLA 2000). Por lo tanto, los algoritmos de segmentación de imágenes se han ampliado y adaptado a estos nuevos datos, teniendo en cuenta el aspecto de las nubes terrestres en 3D.

Al manejar la información del escáner como un elemento único se limita la manipulación e interpretación de los componentes del espacio, por ello de la necesidad de segmentar y clasificar la nube de puntos de forma semiautomática, llevándonos a organizar, parametrizar y post-procesar esta información en elementos identificables, como un paso indispensable en el proceso que conduce a la modelización tridimensional de los edificios, o al simple entendimiento de las características que lo componen.

Las publicaciones de segmentación de los datos láser se pueden agrupar en dos familias: la primera se basa en el principio de fusión (o agregación) y la segunda en el reconocimiento automático de formas geométricas. Ejemplos representativos de estas tendencias son las publicaciones de (WANG y TSENG 2004) y (SCHNABEL, WAHL y KLEIN 2007), en las que se proponen enfoques a la segmentación basados en algoritmos de división y fusión (*split-and-merge*) mediante el uso de una estructura *octree*[31], en el mismo contexto (PU y VOSSELMAN, Building facade reconstruction by fusing terrestrial laser points and images Sensors 2009) y (STAMOS y ALLEN 2002) utiliza extensiones del algoritmo de crecimiento de la región, para la extracción de las fachadas de los edificios con planos TLS.

[31] Un octree o árbol octal, es una estructura en "árbol" de datos en la cual cada nodo interno tiene exactamente 8 (octantes) divisiones, de forma consecutiva. Esta técnica es basica en la gestión de nubes de puntos.

3.2.1 Antecedentes de segmentación en el procesamiento de imágenes

En el campo de procesamiento de imágenes se desarrollan principalmente tres métodos de la segmentación, la segmentación por: umbrales, fronteras y regiones (R. W. GONZÁLEZ 2004) y (CALOZ y COLLET 2001).

La segmentación por umbrales es segmentar una imagen en varias áreas, basados únicamente en el histograma de las cuentas de los componentes digitales. En cada histograma de la población uni o multi-dimensional se asigna una clase. Los límites de esta segmentación es localizar grandes variaciones radiométricas en la imagen, a través del cálculo de los máximos locales (por ejemplo, el cálculo del gradiente). Estas fuertes variaciones corresponden a la frontera entre las regiones.

Al final, la segmentación región se realiza sobre la base de un criterio de homogeneidad, del tipo o nivel de variación del nivel de gris a gris (por ejemplo "todos los pixeles son el mismo nivel gris" o "el cambio en nivel de gris no exceda un nivel *n"*). Entre los métodos utilizados en esta familia incluyen el algoritmo de crecimiento de la región, propuesta por Besl y Jain (BESL y JAIN 1988) o la segmentación por división y fusión de (HOROWITZ 1976).

La segmentación de “imágenes” por rango se basa en imágenes 2.5D, estas facilita la aplicación de algoritmos y al mismo tiempo su comparación con las nubes de puntos en tres dimensiones, permitiendo la aplicación eficiente de procesamientos de imágenes, con procesos estándares, ampliamente estudiados en la visión por computación, al punto de permitir la relación de diversas fuentes de información con imágenes de múltiples capas, logrando segmentaciones multiespectrales.

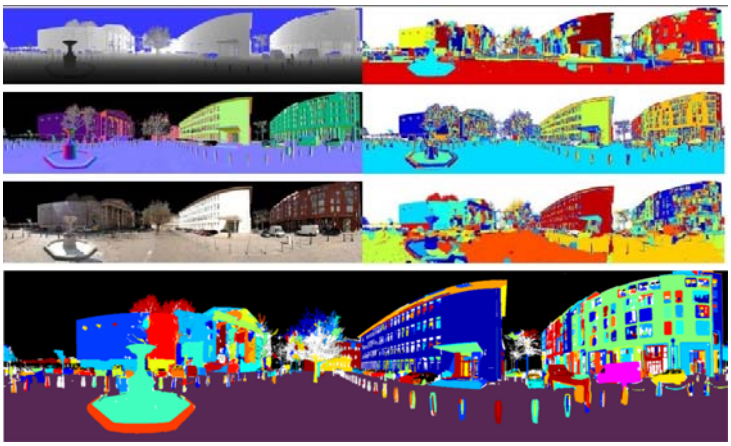
En ellas se logran interpretar diversos parámetros, aparte de la posición, la intensidad o el color, existe la relación de las coordenadas en tres dimensiones con las imágenes en dos dimensiones en relación a las coordenadas esféricas, manteniendo la dirección de la normal, el ángulo del escáner y la distancia con el origen.

En el ejemplo presentado a continuación , se utiliza el algoritmo de *Comaniciu y Meer* del 2002, llamado “Mean – *Shift segmentation*” (S. BARNEA 2008), una segmentación basada en el rango y relación de puntos cercanos.

Mediante este algoritmo se procedió a segmentar diferentes informaciones, obteniendo piezas de menor o mayor tamaño dependiendo de las propiedades de la información base, identificando las relaciones de la geometría y las propiedades de los materiales, como el agua de la fuente, o los colores de una misma fachada, lo cual demuestra el potencial de trabajar la información del escáner terrestre como imágenes de múltiples capas.

En la se tiene: A la izquierda en orden la imagen de rango, las normales y el color. A la derecha los resultado de la segmentación usando el algoritmo “mean-shift”, segmentación por rango (superior derecha), segmentación de las normales (medio derecha), segmentación de la imagen de color verdadero (inferior derecha)

Ilustración 36: Segmentación de panoramas TLS y resultado de la segmentación corregida integrando las tres segmentaciones anteriores. La de rango, normales y color



Fuente: (S. BARNEA 2008)

3.2.2 Segmentación basada en el principio de fusión

Estos procesos adoptan técnicas de fusión para segmentar la nube de puntos. La clasificación y segmentación se realiza mediante tres tipos de algoritmos, el primero es la segmentación basada en el crecimiento de las superficies, que busca factores parecidos de las superficies como la medida, a partir de una selección de puntos semilla y el crecimiento con relación a los puntos vecinos, siendo un método menos sensible al ruido de los datos. El segundo método es la segmentación por división y unión, dividiendo la nube en una estructura octree y reagrupando los datos cuando cumplen ciertos parámetros en esta estructura.

El último tipo de segmentación es basado en líneas de barrido, en la que cada fila es considerada un barrido, que puede ser tratado independiente de los demás datos en la etapa inicial y se basa en el principio de que cada línea de barrido en cualquier plano 3D genera una línea 3D, detectando estas líneas y agrupando las similares puede formar superficies planas.

En las publicaciones de (PU y VOSSELMAN, Building facade reconstruction by fusing terrestrial laser points and images Sensors 2009) y (STAMOS y ALLEN 2002) se utilizan extensiones del algoritmo de crecimiento de la región, para la extracción datos de las fachadas de los edificios, con la detección planos en la información TLS.

En el mismo contexto (WANG y TSENG 2004) y (SCHNABEL, WAHL y KLEIN 2007) proponen enfoques a la segmentación basados en algoritmos de división y fusión (split-and-merge) mediante el uso de una estructura octree (equivalente a imágenes quadtree[32]).

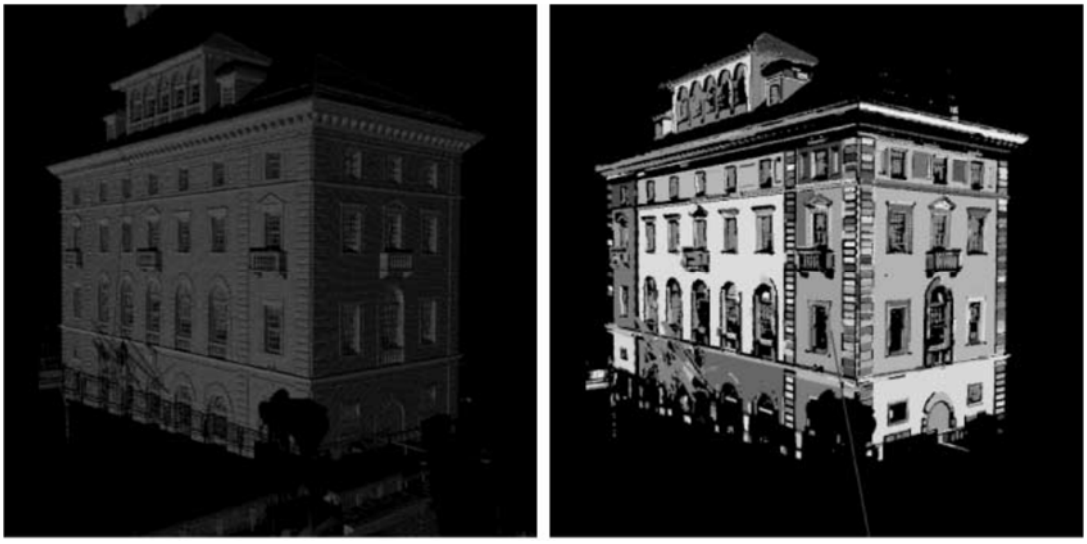
[32] El término Quadtree, o árbol cuaternario, es una estructura de datos basada en la descomposición recursiva del espacio en cuatro y al interceptar un nuevo elemento este se subdivide en cuatro de forma sucesiva si el proceso se repite.

3.2.3 La segmentación por crecimiento de la superficie

Este proceso de crecimiento de las superficies por dispersión es equivalente al crecimiento de imágenes de la Ilustración 37, parte de la identificación de puntos (semillas de la superficie *seed*), y su crecimiento con relación a los puntos vecinos (STAMOS y ALLEN 2002), encontrando los puntos de un plano por crecimiento, agrupándolos de forma progresiva.

En la publicación de (VOSSELMAN, GORTE, y otros 2004), se proponen ajustar varios conjuntos de puntos en un plano y analizar los residuos. Así, el conjunto de puntos en el plano con la menor desviación estándar (desviación estándar simultáneamente por debajo de una cierta tolerancia) de la superficie que se desea la “semilla”. Esto implica por lo menos una porción de puntos coplanares en los datos. En la presencia de ruido, el error RMS asociado con el plano puede ser alto, a veces significa un fallo en la detección de la “semilla” de la superficie. En este caso, los algoritmos más robustos y resistentes al ruido, tales como *RANSAC* y la transformada de *Hough* puede ser una alternativa. Existen variantes a este proceso, principalmente en relación a la forma de seleccionar las “semillas” y los tiempos de salida en los criterios de crecimiento. En los criterios de crecimiento, Ilustración 38.

Ilustración 37: Ejemplo de clasificación por crecimiento de la superficie.

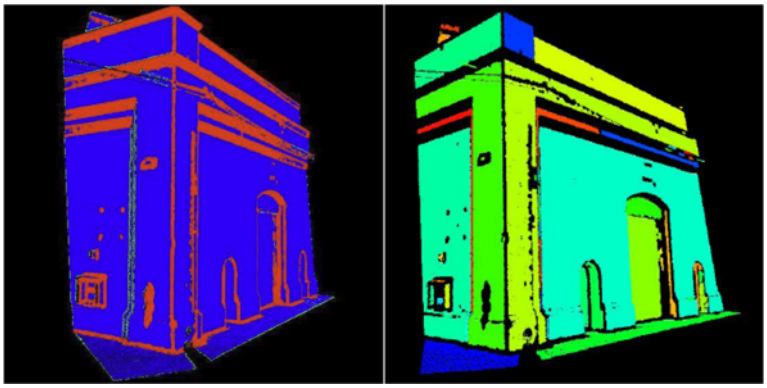


Fuente: (STAMOS y ALLEN 2002)

Las ventajas de su aplicación se dan en términos de velocidad y facilidad de implementación. Las desventajas de los algoritmos de crecimiento de superficie son, por un lado la gran influencia que las muestra “semillas” de partida, que se generan en los resultados finales. Además, a menudo es difícil de predecir si una región puede o no aumentar, particularmente si los datos son ruidosos.

Para reducir la influencia de partida de las “semillas” se propuso una solución que consiste en considerar varias “semillas” al tiempo, las cuales crecen de forma independiente y a la vez, para ello se basan en cálculos estadísticos robustos, en la extracción de las “semillas” (GOTARDO, y otros 2004). También existen errores de "sobre-segmentación," error "sub-segmentación" y el error "no segmentación".

Ilustración 38: Segmentación de los bordes y clasificación de superficies planas



Fuente: (BELTON 2006)

Otros autores como (YU, y otros 2008) señalan que el problema de que los algoritmos de crecimiento no son suficientes para encontrar segmentos de planos adecuadamente, al partir solo de la condición de encontrar un plano local y no garantizar que el segmento final sea un plano en su totalidad.

Para superar esta dificultad, los autores sugirieron un método que tiene en cuenta la forma plana general de los segmentos. Se compone de una fase de agregación (*clustering phase*), seguido por una fase de mejora. La fase de agregación es a los puntos de un grupo si son coplanares. Las ecuaciones de planos obtenidas se han depurado, utilizando una variante del algoritmo *K-means*, condicionándolo a formas planas en la fase final (COHEN-STEINER, ALLIEZ y DESBRUN 2004).

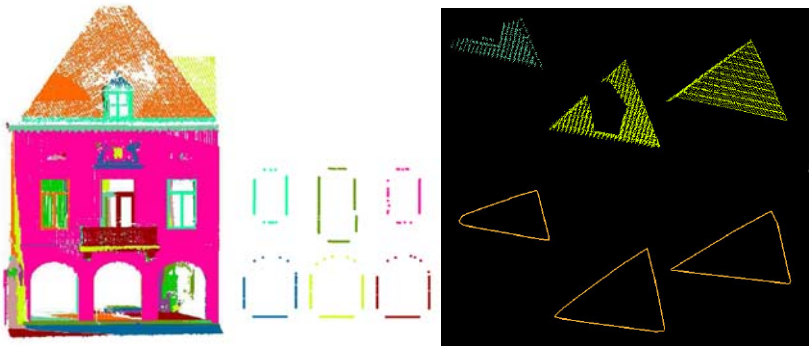
La detección de formas geométricas ha avanzado mucho, pero la interpretación de estas es limitada, no se ha llegado a que las estructuras de las fachadas sean reconocibles de forma automática por las maquinas, por lo contrario las capacidades humanas permiten el fácil reconocimiento de los elementos que componen el espacio. Aun así se han llegado a desarrollos como los de (S. PU, Extracting Windows from Terrestrial Laser Scanning 2007), permitiendo un interpretación compleja del espacio urbano, en relación a la posición de los planos, la forma, el color, la tipología, mediante procesos programación a partir de parámetros semánticos, Ilustración 39.

En busca de acercarse a este objetivo, se han planteado criterios que permitan una identificación de elementos, de forma semiautomática, complementario a la clasificación por crecimiento, en relación al tamaño, posición y tipología, según(BOULAASSAL 2007) alguno de estos parámetros son:

- **Restricción de tamaño:** Los elementos como paredes, ventanas y puertas se pueden distinguir fácilmente de otros elementos o segmentos con ruido por su tamaño.
- **Posición determinada:** Ciertas elementos sólo aparecen en determinadas posiciones. Por ejemplo, las ventanas y las puertas están siempre en las paredes, los techos son siempre en la parte superior de las paredes.
- **Dirección determinada:** Las paredes y techos son identificables por su dirección, por ejemplo las paredes casi siempre son verticales, por lo contrario las cubiertas no lo son.
- **Topología restringida:** Los elementos que constituyen un edificio tiene tipologías que relacionan sus partes, por ejemplo el terreno siempre se cruza con las paredes y tos techos se interceptan con las paredes.

- **Restricciones varias**: Existen algunas relaciones que puede permitir reconocimiento, pero no son fijas. Por ejemplo, a veces las zonas de ventanas suelen tener menor densidad de puntos, ya que el vidrio refleja un número menor de pulsos láser, en comparación con otras partes de un edificio, pero esto sólo es una restricción opcional de categoría, ya que a veces las ventanas están cubiertas con cortinas y reflejar más pulsos láser.

Ilustración 39: Clasificación de elementos de fachada y generación de polilíneas de contorno



Fuente: (S. PU, Extracting Windows from Terrestrial Laser Scanning 2007)

Este método parte de la idea de que los puntos de una línea de nube (o "perfil" de la nube) que pertenecen una superficie plana son líneas rectas en 3D (JIANG y BUNKE 1994). Por lo tanto, esta segmentación se inicia mediante la separación de los perfiles verticales de las nubes. Esto se puede lograr ya sea por conocer el momento de la adquisición de cada punto, o por el modo en que se escanea.

3.2.4 Segmentación por perfil de escaneo

Esta segmentación parte de las siguientes premisas: un segmento se considera correcto si la distancia máxima entre el punto más alejado y la línea recta es menor que un valor predeterminado, finalmente, los segmentos rectos se comparan con los de los perfiles de vecinos y si los segmentos son vecinos en el mismo plano, se fusionarán bajo los mismos criterios que los utilizados en el algoritmo de crecimiento de la superficie. Este procedimiento le permite agrupar elementos similares con las mismas propiedades (misma dirección del vector normal calculado con los vecinos más próximos).

De hecho, se puede considerar que este método es una nueva variante del método de crecimiento de regiones, ya que la segmentación parte de semillas en relación a líneas y no a superficies.

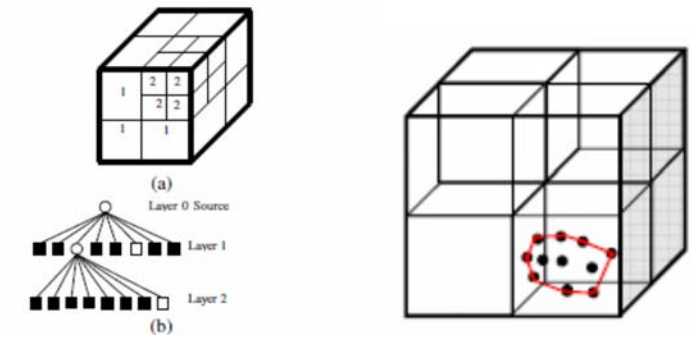
Este método ha sido adoptado para segmentar datos de escáner aéreos LiDAR (VOSSELMAN, GORTE, y otros 2004), ya que mejora la separación de los perfiles mediante la adición de criterio de segmentación como información sobre la dirección de líneas. Por lo tanto, se divide el archivo en filas de puntos de escaneo de la misma orientación y se clasificaron, si los segmentos de línea orientados norte-sur (NS) o este-oeste (EW) tienen una serie de puntos comunes, estos se fusionan y se asignan a la misma región.

3.2.5 Segmentación por la división y fusión

La nube de puntos se divide según la estructura iterativa octree, con el objetivo de extraer las superficies planas (WANG y TSENG 2004), analizando la nube en entidades de menor tamaño hasta encontrar las que son coplanares. Este proceso se puede describir de la siguiente forma: a través de los octree la nube se subdivide, y en cada etapa la coplanaridad de los puntos que están contenidos en un cubo del octree (octantes) se prueba en cada nivel, si la prueba es positiva la subdivisión se detiene, de lo contrario continúa hasta que todos los cubos contienen puntos coplanares o están vacíos.

Inicialmente, se comienza desde el nivel 0, es decir un cubo del octree que contiene todos los puntos de la nube. Este cubo se subdivide en ocho sub-cubos (nivel 1). Si los puntos de un cubo no son coplanares, entonces el cubo se vuelve a subdividir en ocho sub-cubos. El proceso se detiene cuando se obtiene cubos llenos de puntos coplanares o los cubos vacíos. La Ilustración 40 muestra un ejemplo de los pasos de dicho algoritmo.

Ilustración 40: Estructura iterativa octree para encontrar puntos coplanares

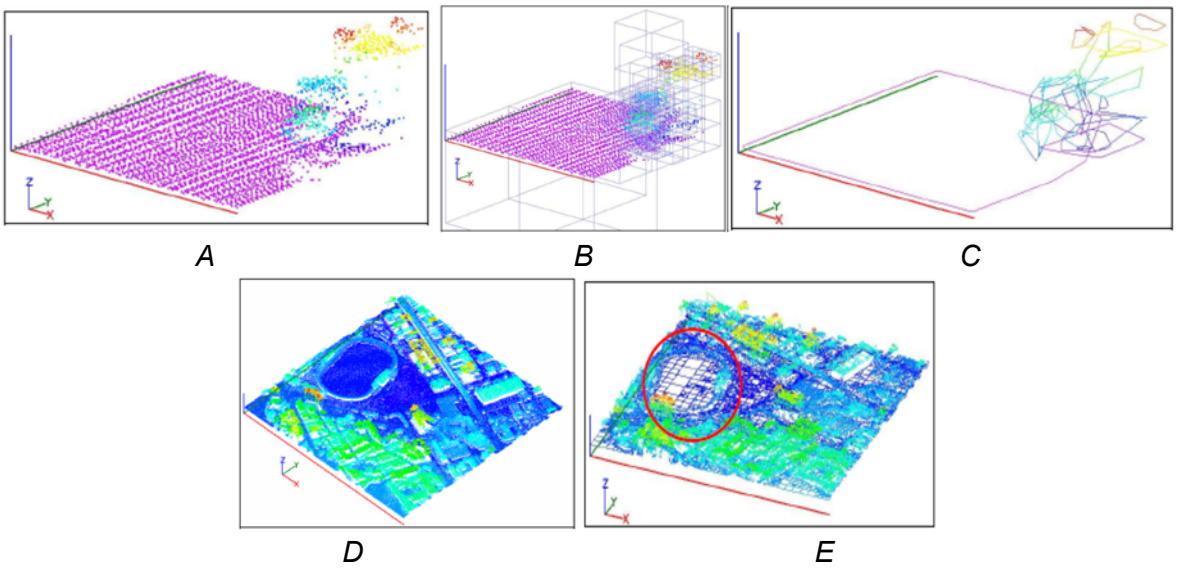


Fuente: (WANG y TSENG 2004)

Este proceso se basa en algoritmos de segmentación por procesos de división y agrupación, de las regiones, de acuerdo a su adyacencia (HOROWITZ 1976). La división de la nube se sobrepone y compara a un plano, para cada grupo de puntos, cuando se comprueba se detiene la división, cuando se cumplen los criterios de coplanaridad seleccionados se continua con la etapa de fusión, para las superficies divididas erróneamente.

La principal ventaja de estas segmentaciones por división y fusión, es su capacidad de gestionar archivos de grandes dimensiones, complejos, de forma rápida, al igual que facilidad de implementar dichos algoritmos. Su principal inconveniente es la afectación del ruido, en comparación con otros procesos menos sensibles al ruido de la nube de puntos. Para solucionar este problema, otro enfoque de la segmentación se basa en la extracción de las formas geométricas, Ilustración 41.

Ilustración 41: A) Ejemplo de un escáner aéreo LiDAR, B) subdivisión octree, C) unión de los bordes del plano que mejor encaja, D) Ejemplo LiDAR escala urbana, E) Resultado de la división



A *B* *C*

D *E*

Fuente: (WANG y TSENG 2004)

3.2.6 Segmentación por el reconocimiento de formas geométricas

La mayoría de los procedimientos de clasificación y segmentación se basan únicamente en la información geométrica derivada de las coordenadas de los puntos en 3D. Una de las razones detrás de esto es que esta información es común a todas las nubes de puntos, independientemente del hardware o de configuración del escáner, técnica fotogramétrica, etc. Otra razón es que el objetivo de los procedimientos de clasificación y segmentación se dirige principalmente a la extracción de características geométricas. Los procedimientos que utilizan la información geométrica se pueden categorizar como detección de borde o técnicas basadas en la detección de superficie.

Técnicas basadas en líneas

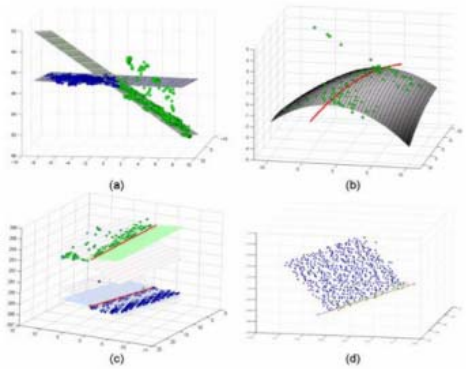
Estas técnicas se segmentan por las intersecciones o fronteras de las superficies, mediante la extensión de la superficie, Ilustración 42. Los puntos de la superficie se agrupan en segmentos comunes delimitadas por las extensiones superficiales identificadas. Los puntos de borde son determinados por una métrica que representa o bien la variación de la curvatura o de la superficie (RABBANI, HEUVEL y VOSSELMAN 2006).

El método más simple consiste en estimar una superficie plana de los puntos alrededor de un punto de interés, con el con el fin de encontrar la normal de la superficie, puesto que la cantidad de variación en la dirección normal de la superficie proporciona una indicación del nivel de curvatura o cambio en la superficie local (Ilustración 43), a menudo este proceso se realiza a través de un análisis de Componentes Principales (*Principal Component Analysis* PCA) o la regresión de mínimos cuadrados.

Un problema con este método es que no existe un componente direccional a la aproximación de la curvatura, que es adimensional y sin unidades, y también se ve afectada por el ruido (M. N. MITRA 2004). Este problema se puede superar al examinar las direcciones de las normales para cada punto,

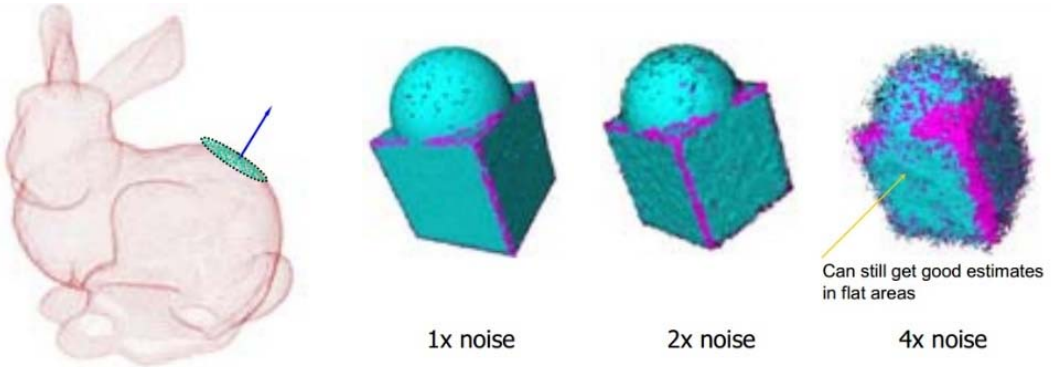
en un barrido de la normal entre puntos vecinos, la variación en la orientación normal proporciona una indicación de si hay cambio en la superficie o si hay una curvatura presente en el entorno local (PAGE, y otros 2002).

Ilustración 42: Reconocimiento de intersección de planos y detección de líneas



Fuente: (CHRISTIAN 2008)

Ilustración 43: La normal usando en relación a un plano y efecto de aumentar el ruido en la estimación del error



Fuente: (M. N. MITRA 2004)

Técnicas basadas en superficies

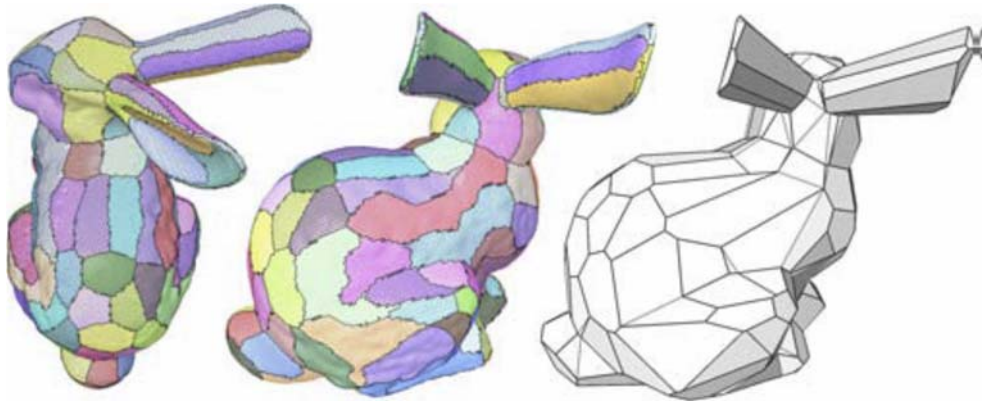
En el campo de visión por ordenador (*computer vision*), las dos metodologías más conocidas para la extracción de formas son: el paradigma RANSAC (FISCHLER 1981) y la transformada de *Hough* (HOUGH 1962), tanto en 3D como en 2D. Ambas consumen un alto porcentaje de los recursos de los ordenadores, por lo cual se han desarrollado numerosos estudios que buscan acelerar sus procesos.

En el campo de gráficos por ordenador (*computer graphics*) también se utilizan los procesos (RANSAC y la transformada de Hough), por ejemplo con la propuesta de detección *RANSAC-base plane* (se explica en profundidad en la unidad 3.3.2 Clasificación de planos múltiples). Actualmente en este campo se han desarrollado aproximaciones a la detección de planos, que no solo buscan la detección de elementos, si no que buscan una visión global optima de la representación del objeto, utilizando un número dado de primitivas (COHEN-STEINER, ALLIEZ y DESBRUN 2004) (Ilustración 44) y (WAHL, GUTHE y KLEIN 2005).

Sin embargo, estos métodos requieren información de conectividad y debido a que usan más que todo un ajuste de mínimos cuadrados, son susceptibles a errores con valores atípicos. Además, el procedimiento de optimización es computacionalmente caro, lo cual lo convierte en los métodos menos adecuado para grandes conjuntos de datos.

En el campo de la ingeniería inversa, la detección de superficies se basa en la segmentación de las superficies, a partir de una variedad de algoritmos de crecimiento de la superficie, anteriormente explicados.

Ilustración 44: Partición geométrica, optimización derecha

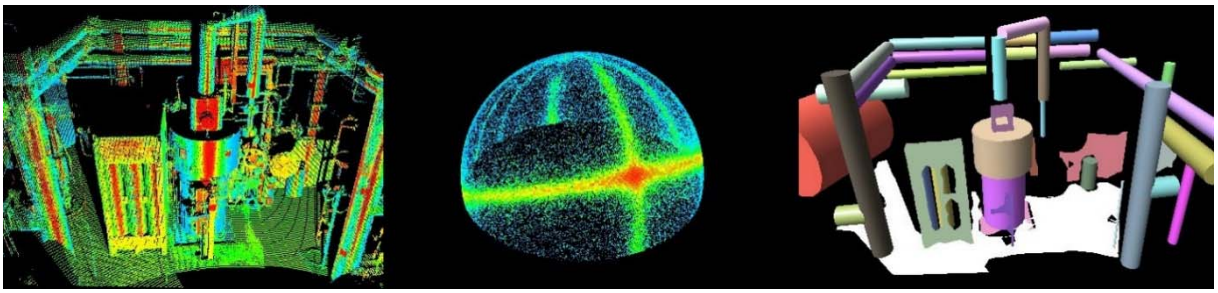


Fuente: (COHEN-STEINER, ALLIEZ y DESBRUN 2004)

La Transformada de Hough

Es una variación del mismo proceso en 2D, capaz de detectar curvas de forma paramétrica con una forma conocida, se ha aplicado principalmente en la segmentación de los datos láser terrestres de elementos industriales como tuberías, compuestas principalmente por planos, esferas y cilindros (VOSSELMAN, GORTE, y otros 2004), Ilustración 45. Este algoritmo se utiliza para escenas de puntos limitada, por el costo computacional y los requerimientos de memoria.

Ilustración 45: Detección de tuberías con la trasformada de Hough



A *B* *C*

Fuente: (VOSSELMAN, GORTE, y otros 2004)

En la Ilustración 45 podemos identificar: A) Escena industrial con puntos de color codificado por su dirección normal de la superficie. B) Media esfera gaussiana con círculos correspondientes a las direcciones de los ejes dominantes del cilindro. C) Detección de planos y cilindros

RANSAC (RANdom SAmple Consensus)

El método iterativo *RANdom SAmple Consensus* (RANSAC) propuesto por (FISCHLER 1981): es un método iterativo para estimar parámetros de un modelo matemático, a partir de un conjunto de datos observados.

Proviene del campo de visión por computador y se utiliza principalmente en la Fotogrametría, para encontrar los puntos correspondientes de un par de imágenes (Método DARCES) (CHEN, HUNG y CHENG, RANSAC-based DARCES: A New Apágroch to fast Automatic Registration of Partially Overlapáging Gande Image 1999). Se utiliza también como algoritmo de segmentación geométrica, debido a su capacidad para reconocer automáticamente las formas a través de los datos (planos, cilindros, esferas y toros), a pesar del ruido de las mismas.

Las primeras aplicaciones del paradigma RANSAC desde los datos TLS fue la extracción de planos, de fachadas de los límites de 620 edificios catastrales y el modelo digital de elevación de la zona urbana de estudio, llevado a cabo por (DURUPT y TAILLANDIER 2006).

La adaptación del algoritmo a diferentes formas geométricas tiene en cuenta la información de la normal. También requiere la estimación del número de puntos necesarios para determinar la forma primitiva.

3.3 Clasificación de superficies naturales y geométricas en entornos complejos

Diversas publicaciones consideran la segmentación como el primer paso en la extracción de la información de la nube de puntos (VOSSELMAN y MAAS, Airbone and Terrestrial Laser Scanning, 2010), dada la variedad, complejidad, cantidad de información, el valor de la información y los tiempos de procesamiento que requiere su manipulación (LARI, HABIB y KWAK 2011). El objetivo de estas segmentaciones es identificar atributos homogéneos de regiones e introducir en ellas algún nivel de organización, antes de la extracción de información útil. En el caso de datos de láser, la homogeneidad se refiere generalmente a la posición de los puntos en 3D, un criterio de este tipo bien podría ser la curvatura o las formas planas descritas por un conjunto de puntos (DEVEAU 2006).

Para identificar las tendencias de estos procesos, se realizó una investigación relacionada a los programas de clasificación LiDAR aéreo, en busca de una metodología concreta para el proceso deseado, buscando el programa adecuada para separar elementos en ambientes urbanos, especialmente mobiliario, vegetación, aislando los edificios y el suelo para su posterior análisis a escala urbana, en esta tarea se comprobaron los siguientes programas LiDAR de clasificación:

LP360 permite la integración con ArcGIS[33]: Es una extensión de software LiDAR que se puede utilizar tanto en ArcGIS de ESRI, también como un programa paralelo. La extensión LP360 LiDAR

[33] http://www.qcoherent.com/evaluation.html programa comercial con versión de prueba 30 días

utiliza una capa de datos ArcMap especializada para datos provenientes de archivos LAS, el cual es un estándar para el manejo de información de escáner láser aéreos. LP360 integra completamente los archivos LAS como nubes de ArcGIS sin necesidad de un proceso de importación o conversión. Con LP360 datos LiDAR se pueden combinar con los datos en cualquier formato compatible con ArcGIS. Palabras claves: LiDAR, Clasificación, líneas de corte, visualización, extracción, procesos automáticos.

MCC-LiDAR[34]: Programa de fuente abierta para el procesamiento del retorno (*discrete-return*) del registro de datos LiDAR en ambientes forestales. Se clasifican los datos de suelo y no suelo, utilizando los algoritmos de clasificación de curvatura desarrollados por (EVANS y HUDAK 2007). Palabras claves: clasificación, filtro, curvatura, terreno, interpolación, nube de puntos, gridding, DEM, binning y puntos a *grid.*

LASTools[35](basado en libLAS del Instituto Geológico de Iowa): Es una colección de herramientas por lotes, con comandos de línea multi-corepara su programación, tiene una interfaz gráfica de usuario y herramientas para el entorno de ArcGIS, para archivos LiDAR basada en procesamiento en LASlib (con LASzip). Las herramientas que posee para clasificación son: **lasground.exe** clasificación de los puntos del terreno, **lasclassify.exe** clasifica puntos fuera del terreno, **lasheight.exe** calcula la altura de los puntos en relación al suelo, **las2txt.exe** convierte en LAS en un formato legible para su edición como ASCII, **lasmerge.exe** une archivos LAS útil para reunir elementos clasificados. Las otras herramientas son: **lasoverlap.exe, calidad lascontrol.exe, lasgrid.exe, lasboundary.exe, lasclip.exe, lastile.exe, laszip.exe, lasinfo.exe, lasindex.exe, txt2las.exe, lassplit.exe, ordena lassort.exe, las2las.exe.** Palabras claves: filtrado, recorte, reproyección, compresión, clasificación, DSM DTM TIN, curvas de nivel*, bare-earth*.

Cloud Compare[36]**:** Es un programa que permite comparar nubes de puntos y mallas libres, se diseñó para comparar nubes de puntos en grandes conjuntos de datos, posteriormente se ha extendido y permite el procesamiento de las nubes de puntos, como con procesos de clasificación RANSAC y análisis de nubes de puntos 3D. Palabras claves: nueves 3D, comparación, clasificación.

Point Cloud Library PCL[37]**:** Es un proyecto abierto a gran escala, para el procesamiento de nubes de puntos. Tiene numerosos algoritmos de última generación, como el filtrado, la estimación de función, reconstrucción de la superficie, el registro, ajustar modelos y procesos de segmentación. Es gratuito para uso comercial y de investigación. El proyecto es apoyado financieramente por varias empresas, entre ellas: WillowGarage, NVidia, en Google y Toyota. Palabras clave: nubes de puntos, visualización, procesamiento, segmentación, el filtrado, la estimación de función, el registro.

Terrasolid[38]**:** Se compone de tres programas, TerraMatch, TerraModeler y TerraScan. Estos programas estos orientados al procesamiento de escáneres láser aerotransportados. TerraScan permite la clasificación de vuelos LiDAR brutos en suelo, tipos de vegetación y edificios, permitiendo al mismo tiempo la edición manual.

[34] http://sourceforge.net/apps/trac/mcclidar/ programa libre
[35] http://rapidlasso.com/ paquetes de aplicaciones libres algunas libres otras necesitan licencia comercial
[36] http://www.danielgm.net/cc/ programa libre
[37] http://www.pointclouds.org/ paquetes de aplicaciones libres
[38] http://www.terrasolid.fi/ programa comercial

VRmesh[39]**:** Herramienta Clasificación nube de puntos LiDAR. Es una solución inteligente para la clasificación de nubes de puntos automática y extracción suelo-tierra. De forma automática y precisa clasifica las nubes de puntos LiDAR en el suelo, la vegetación, la construcción, y otros. Se pueden realizar ajustes manuales a través de una vista en sección transversal. También ofrece funcionalidades integrales para generar mallas de triángulos exactos. Palabras claves: clasificación, terreno desnudo, nube de puntos, análisis de terreno, LiDAR, segmentación, filtrado, registro, puntos a grid, clasificación, filtrado, curvatura, suelo, LAS. Se profundiza este programa en el apartado 3.3.1 Superficies naturales.

RANSAC Toolbox de MATLAB[40]**:** MATLAB es un software matemático en un entorno de desarrollo integrado (IDE) con lenguaje de programación propio (lenguaje M). La aplicación RANSAC Toolbox se basa en las aportaciones (CHEN, HUNG y CHENG, RANSAC-based DARCES: A New Apágroch to fast Automatic Registration of Partially Overlapáging Gande Image 1999), utilizando algoritmos de *RANdom SAmple Conesenus*, para estimar parámetros como por ejemplo de un plano dentro de la presencia de un gran número de valores atípicos. Palabras claves: clasificación, plano, cono, cilindro, esfera.

CANUPO[41]: Conjunto de aplicaciones diseñadas para la clasificación de superficies naturales, como vegetación, agua, piedra, en relación a la geometría (es decir, superficies rugosas vs superficies planas, etc.) y escala (BRODU y LAGUE 2012). Se profundiza estas aplicaciones en el apartado 3.3.1 Superficies naturales.

A partir de esta búsqueda se establecen dos parámetros a clasificar en entornos complejos, el primero es la vegetación o superficies naturales, y el segundo los elementos que componen los edificios, principalmente conformados por planos.

3.3.1 Clasificación de superficies naturales

En los últimos años se han propuesto diversos procesos automáticos de clasificación, la mayoría de estas técnicas se han desarrollado inicialmente con datos LiDAR aéreos. Estos datos se adquieren en 2.5D, lo que da la posibilidad de transformarlos en imágenes, sin correr el riesgo de una pérdida significativa de la información (MASAHARU y HASEGAWA 2000). Lo cual es diferente con las nube de puntos obtenida por el escáner láser terrestre, que se adquieren en 3D (VOSSELMAN, GORTE, y otros 2004), ya que la conversión de estas nubes de puntos en una cuadrícula 2D podría causar una gran pérdida de información espacial (AXELSSON 1999). Por lo tanto, los algoritmos de segmentación de imágenes se han ampliado y adaptado a estos nuevos datos.

Esta pérdida de información se tiene en cuenta en los nuevos métodos de clasificación de escáner láser terrestre, como el propuesto por (BRODU y LAGUE 2012), en relación a las superficies naturales, plantean que estas son homogéneas y que tienen propiedades específicas que permiten su identificación en relación a múltiples escalas de análisis. Destacan las nuevas necesidades surgidas por la exploración TLS terrestre, en relación a las siguientes premisas:

[39] http://www.vrmesh.com/demo/download.asp programa comercial
[40] http://www.mathworks.com/matlabcentral/linkexchange/links/1814-ransac-toolbox programa comercial y herramienta pública
[41] http://nicolas.brodu.net/en/recherche/CANUPO/index.html programa libre LGPL v2.1

1) Los datos LiDAR son en su mayoría en 3D en lugar de modelos digitales de elevación 2.5D. En muchos casos las superficies 3D no pueden ser fácilmente descritas en dos dimensiones, en otros casos le información en dos dimensiones no es suficiente para describir características tridimensionales.
   Cabe anotar que en algunos casos, el estudio de la nube de puntos en 3D es estudiada en 2D (ABELLÁN, y otros 2010), (HODGE, BRASINGTON y RICHARDS 2009), (otros ejemplos se encuentran en la unidad 2.2.1 Inspección geométrica TLS, información XYZ), como métodos de reproyección en imágenes ráster, existiendo procesos eficaces para tal fin.
2) La falta de homogeneidad de las nubes de puntos TLS terrestres, existen vacíos o sombras de la información por oclusión y datos que no pueden ser registrados por su alta reflectancia (ver unidad 2.3.2.3 Análisis del error TLS), que están en relación a la ubicación del sensor en la toma de datos en los TLS terrestres y los materiales escaneados.
3) La complejidad de superficies naturales (variedad de escalas de detalle, tipo de elementos, frecuencia, densidad, etc.) de grandes escenas desde hierbas hasta árboles, requiere un análisis en 3D, que permita identificar las estructuras y la complejidad de los elementos.
4) Densidad de puntos de TLS terrestre, la cual va en aumento. Para ello se requieren procesos automatizados, minimizando la manipulación de los usuarios, en procesos para grandes y complejas escenas en 3D.

Podría decirse que, la interpolación se debe utilizar como último recurso, y en particular, sólo después de la escena 3D ha sido clasificado correctamente para eliminar, por ejemplo, la vegetación.

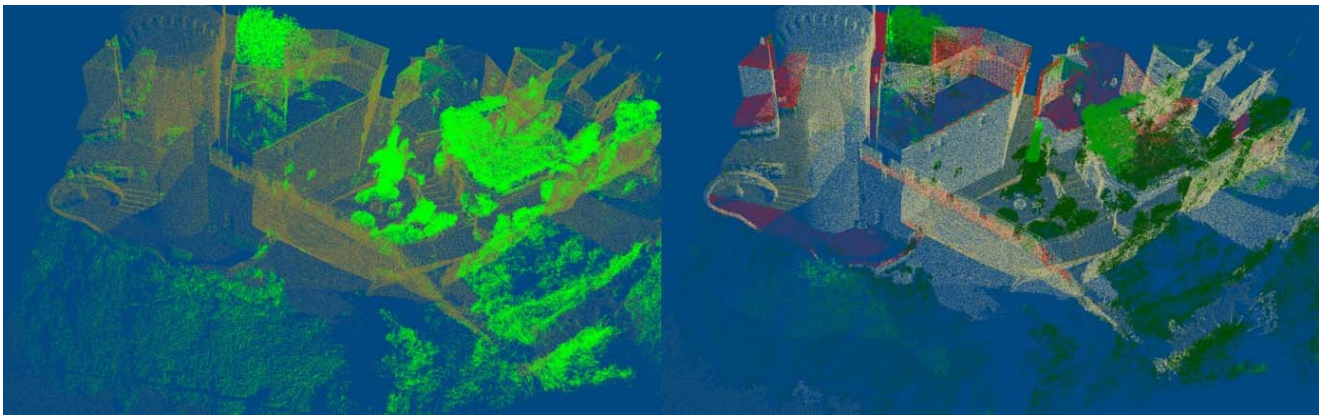
En la Ilustración 46 se realiza una clasificación basada en programas LiDAR aéreos, partiendo de la comparación de los programas planteados LiDAR comparados anteriormente, sobre la misma zona de estudio, destacando los conceptos de clasificación por planos de superficies de suelo y techo y la clasificación en base a la "rugosidad" de las superficies, entendiendo esta rugosidad como vegetación. Al ser procesos orientados principalmente para escáneres aéreos la vegetación se confunde los elementos complejos, como las ventanas, aun así al ser un método estándar permite generar una metodología inicial, aunque luego requiera de su reorganización manual o un proceso semiautomático complementario.

En este proceso se identificó las ventajas de estos procesos en la separación del suelo y las fachadas a escala urbana. Se clasifico la zona urbana de Vila Vella, con la versión de prueba de Vrmesh al ser un programa comercial, que permitió entender otro punto de vista de la clasificación aplicando técnicas LiDAR a escáneres terrestres, que puede ser aplicadas de forma parcial programas o aplicaciones libres, permitiendo plantear una metodología acorde a las necesidades planteadas en los objetivos específicos.

La clasificación por "*rugosidad"* se realizó con un radio de 0.6 m y con un mínimo de 1000 puntos por elemento, ello se traduce en que el algoritmo utilizado tiene en cuenta una única escala de los elementos, y la cantidad de puntos mínima que tiene cada elemento seleccionado, excluyendo de su detección elementos pequeños como vegetación en la fachada, ya que requeriría un proceso de segmentación de menor radio, que sobre segmentaría la nube de puntos. Cabe destacar la rapidez del método, clasifica 50 millones de puntos en menos de media hora.

Esta metodología propia de programas comerciales (ejemplo anterior Meshlab) se profundizo en aplicaciones en desarrollo como Point Cloud Library PCL y CANUPO (*CAractérisation de NUages de POints*) (BRODU y LAGUE 2012).

Ilustración 46: Clasificación por “rugosidad” y clasificación por planos de suelos y techos, programa comercial para la clasificación de escáner LiDAR aéreo Vrmesh

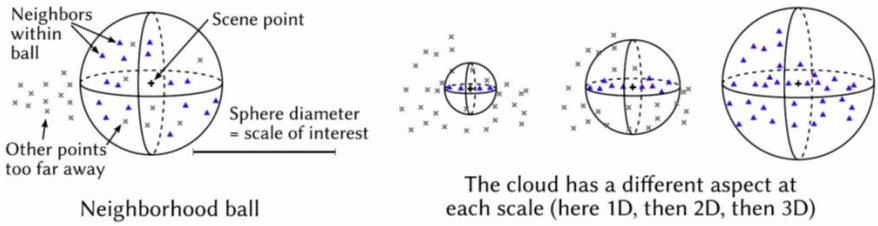


Fuente: Propia

CANUPO clasificación de superficies naturales (BRODU y LAGUE 2012)**:**

En las aportaciones de (BRODU y LAGUE 2012), se plante la clasificación de superficies naturales (piedras, vegetación, suelo, agua, etc.). Mediante análisis a múltiples escalas se buscan características geométricas en dimensiones locales, buscando si los puntos vecinos para cada punto en radios determinados, se parecen a una línea (1D), a un plano (2D), o los puntos se distribuyen en un volumen (3D), Ilustración 47.

Ilustración 47: Superior esferas de puntos vecinos

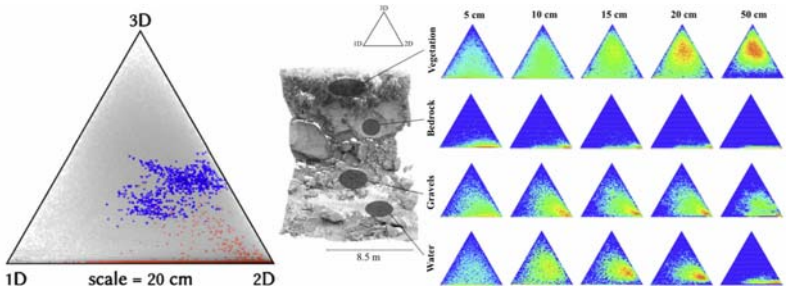


Fuente: (BRODU y LAGUE 2012)

Dimensión local a múltiples escalas: El objetivo de este proceso es tener las características definidas en cada escala y luego mediante un proceso de entrenamiento del sistema se defina la combinación de las escalas que permitan separar dos categorías, por ejemplo suelo y vegetación.

Este proceso se lleva acabo con las aplicaciones de CANUPO, se planea por ejemplo en superficies de 5cm las rocas se parecen más a una superficie 2D, la gravilla a 3D, y la vegetación como una combinación de 1D y hojas 2D. A una escala más grande 30cm la roca sigue siendo 2D, la gravilla más 2D que 3D y la vegetación se convierte en 3D. Cuando se combinan informaciones a diferentes escalas, se pueden identificar con mayor facilidad los objetos, el proceso de CANUPO tiene en cuenta todas las escalas, pero con diferentes pesos para la clasificación, Ilustración 48.

Ilustración 48: Izquierda ejemplo de distribución de puntos para definir su carácter 1D-2D-3D, derecho ejemplo de características de una clasificación a múltiples escalas. Ejemplo del rio Otira.



Fuente: (BRODU y LAGUE 2012)

Clasificación: El principal objetivo de separación de (BRODU y LAGUE 2012) es definir la mejor combinación de escalas que permitan una máxima separación de dos categorías, de forma automática, siguiendo los siguientes pasos:

1) Proyectar los datos en un plano de máxima separabilidad
2) Separación máxima de las clases en el plano[42]. Ello permite una supervisión fácil del proceso de clasificación, con una inspección visual.

CANUPO considera dos procesos de clasificación lineal: análisis discriminante lineal *Lineal Discriminant Analysis* LDA[43] (THEODORIDIS y KOUTROUMBAS 2008) y utiliza máquinas de vectores de soporte SVM[44] (BOSER 1992). La aplicación de estos dos procesos obtiene resultados que se asemejan, los procesos SVM requieren un menor tiempo de computación que los LDA, aunque en este ejemplo del río Otira se utilizó una clasificación LDA, al obtener mejores resultados que con la SVM.

En la Ilustración 49 se ejemplifica una clasificación con *CANUPO*, entre un tipo de vegetación y una clase predeterminada de suelo, como resultado de un proceso automático, con un proceso lineal SVM. El eje vertical no impacta en la clasificación, es usado para que de forma visual los usuarios puedan modificar esta gráfica, que será usada como muestra para la clasificación. La edición del SMV se puede realizar en un programa de edición vectorial, como el programa libre Inkscape[45], al ser el archivo SVG de tipo vectorial y de texto, la edición puede ser el rotar la muestra para que coincida con el eje x, o por ejemplo estrechar el eje Y para que coincida la varianza en los dos ejes, también se puede por ejemplo mover algunos puntos del límite de muestras de vegetación. La zona en gris representa la porción del espacio en el que la confianza de la clasificación es menor del 95%,

[42]La separación máxima a un plano es intuitivo al igual que el proceso Principal Component Analysis (PCA) (Shaw, 2003), en el cual solo quedan dos componentes. La diferencia con el proceso PCA es que se maximiza la separación entre clases

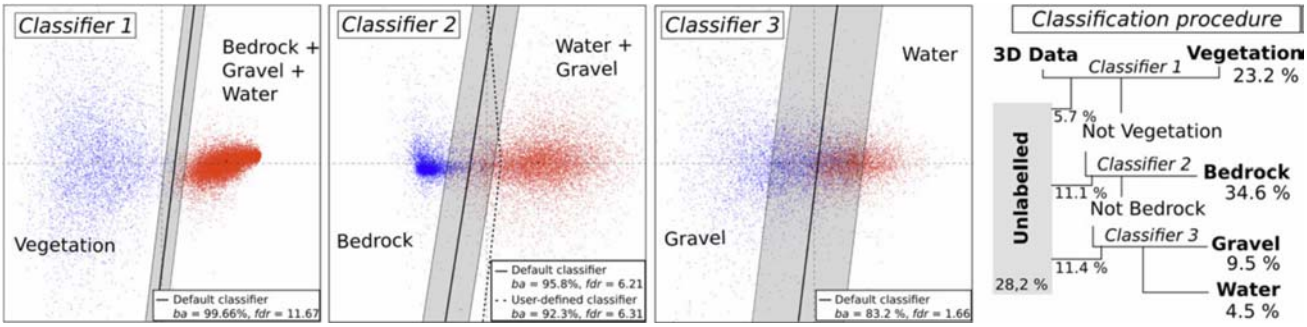
[43]"Linear discriminant analysis (LDA) and the related Fisher's linear discriminant are methods used in statistics, pattern recognition and machine learning to find a linear combination of features which characterizes or separates two or more classes of objects or events. The resulting combination may be used as a linear classifier, or, more commonly, for dimensionality reduction before later classification." (WIKIPEDIA 2012)

44 "Las máquinas de soporte vectorial o máquinas de vectores de soporte (Support Vector Machines, SVMs). Estos métodos están propiamente relacionados con problemas de clasificación y regresión. Dado un conjunto de ejemplos de entrenamiento (de muestras) podemos etiquetar las clases y entrenar una SVM para construir un modelo que prediga la clase de una nueva muestra. Intuitivamente, una SVM es un modelo que representa a los puntos de muestra en el espacio, separando las clases por un espacio lo más amplio posible." Fuente: (Wikipedia 2013)

[45]http://www.inkscape.org/ (fecha de consulta 21/05/2013)

en la segunda grafica de clasificación (clasificación código 2) se realizó una edición manual permitiendo una clasificación sistemática entre la superficie de lecho de piedras y las piedras.

Ilustración 49: Diagrama de la clasificación del rio Otira

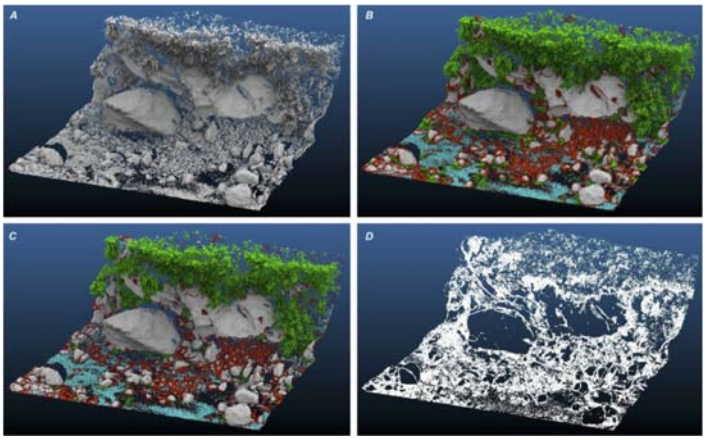


Fuente: (BRODU y LAGUE 2012)

El cálculo de la vecindad de puntos se obtiene con herramientas estándares, en relación a la esfera definida por las escalas, utiliza los el proceso *Principal Component analysis* (PCA). Este proceso es el que requiere más tiempo de cálculo computacional, encontrando las vecindades locales para cada punto a diferentes escalas. El proceso SVM que computa el análisis de discriminación lineal es rápido y no tiene un impacto en el proceso. Para reducir el tiempo de estos procesos se permite el uso de una submuestreo de la escena llamada *Core Points*, en donde se realiza el análisis de vecindad geométrica para toda la base de datos, pero la computación del proceso se realiza solo con los *Core Points*.

La aplicación de *CANUPO* en entornos naturales complejos nos permiten constatar, que las propiedades multi-escala demuestran que no hay una única escala en la cual se pueda distinguir un elemento a clasificar, la vegetación y las piedras son distintos en una escala de gran tamaño, pero la gravilla y el agua son muy similares en un nivel que permita un alto grado de confiabilidad, en el ejemplo del rio Otira, solo a escalas menores de 10-20cm se distingue la piedra de la grava y el agua. En la se muestra el proceso aplicado.

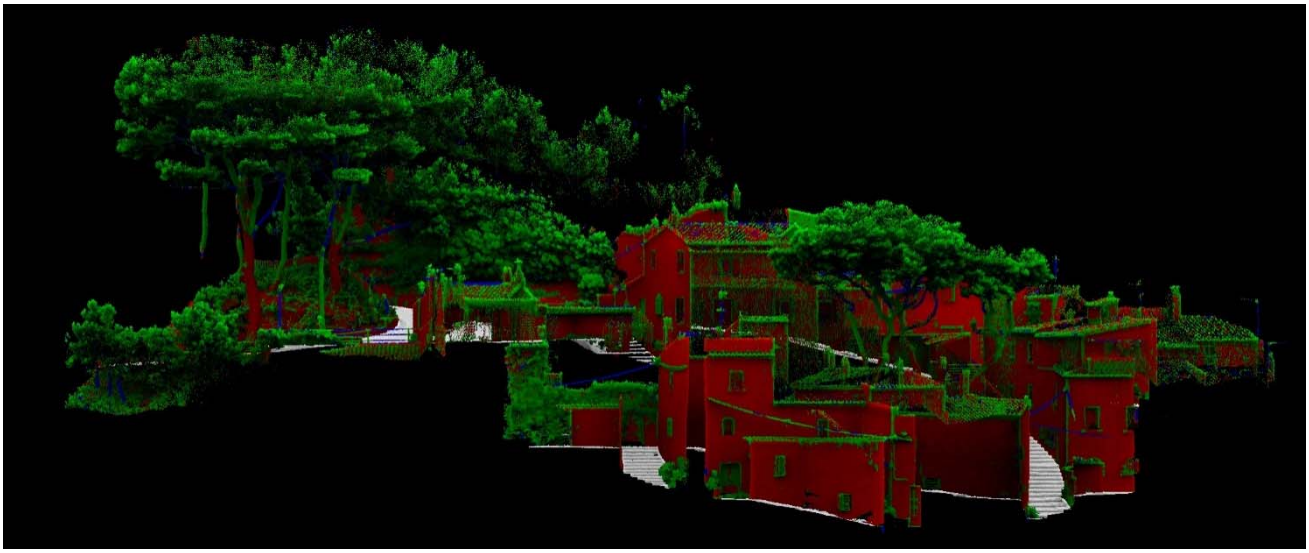
Ilustración 50: Resultado de la clasificación del rio Otira, en 22 escalas, desde 2cm hasta 1m. A) Base de datos, B) clasificación CANUPO, C) edición usuario, D) sin clasificar 28.2% del total



Fuente: (BRODU y LAGUE 2012)

Tiempos de los procesos: El tiempo de procesamiento depende del tamaño de la nube de puntos, en el ejemplo de la Ilustración 51, se requirió 24 horas de procesamiento para una nube de 50 mil puntos, este tiempo se reduce utilizando los *Core Points*, se utilizó un proceso de reducción para crear el *Core Points* de forma aleatoria, disminuyendo los puntos a una cuarta parte, pasando a 12 mil puntos aproximadamente, realizando el mismo proceso en 2 horas, para cada clasificación, en el caso descrito solo se clasificaron zonas volumétricas contra zonas planas.

Ilustración 51: Clasificación natural de un segmento de Vila Vella, Tossa de Mar



Fuente: *Propia*

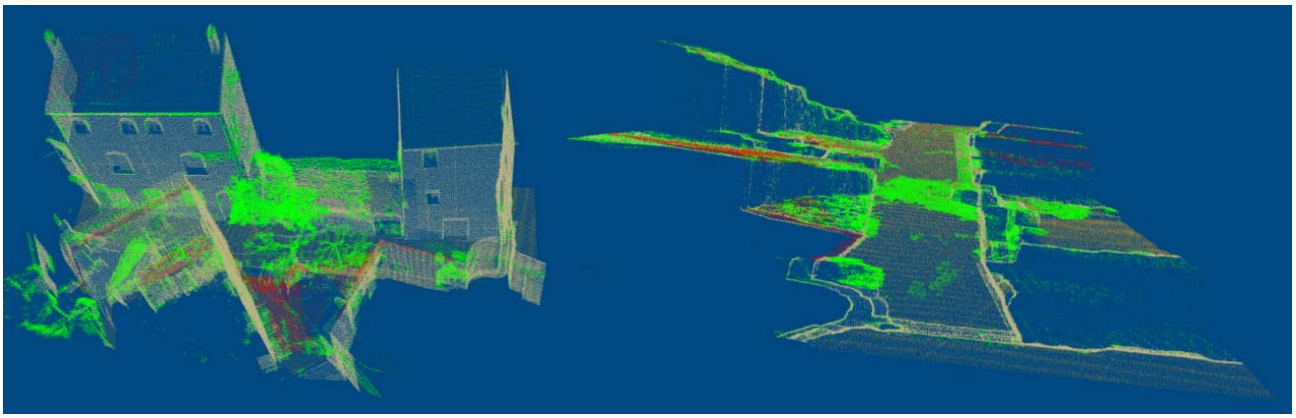
3.3.2 Clasificación RANSAC de planos múltiples

Posterior a la clasificación de superficies naturales, se identifican las superficies horizontales, que conforman grupos de puntos próximos en relación a planos teóricos, en algunos casos como en la Ilustración 52, se llega a dividir estos planos identificando las superficies se suelo y techo, en relación a la altura del plano que se encuentra abajo, entendiendo que esta relación de arriba y abajo se entiende en distancias locales.

Este proceso de identificación por alturas en algunos casos se repite en las clasificaciones de superficies naturales, distinguiendo la vegetación baja de la vegetación alta, en los datos de escáneres aerotransportados se alcanza a clasificar tres tipos de vegetación en base a estos parámetros.

Complementario a ello en programas como Vrmesh la clasificación de superficies de planos va un paso más, permitiendo la proyección de la información de los planos de techo al suelo (punto de vista cenital), rellenando los vacíos que dejaría la eliminación de los elementos que no se consideran suelo, ejemplo de ello Ilustración 52 con el caso de estudio de Villa Vela, en Tossa de Mar.

Ilustración 52: Izquierda detección de Superficies horizontales Slope 74% y mayores de 1.2 m de altura, Suelo: 618.541 puntos / Vegetación: 64.061 puntos / Edificio: 34.728 puntos. Derecha proyección al suelo



Fuente: Propia

Detección de planos RANSAC en MATLAB

El paradigma RANSAC extrae formas al tomar un subconjunto (mínimo número) de puntos en desorden y buscar su correspondencia con las formas primitivas. El resultado de las formas escogidas es testado para todos los puntos, para encontrar cuántos de estos datos se aproximan a la forma primitiva (llamado *score* de la forma). Se han propuesto un extenso número de esquemas RANSAC, entre los que destacan los métodos de MLESAC (TORR y ZISSERMAN, MLESAC: A new robust estimator with application to estimating image geometry 2000), el método MSAC (TORR y ZISSERMAN, Robust computation and parametrization of multiple view relations 1998) y el proceso descrito en la unidad 3.2.2.2 de (SCHNABEL, WAHL y KLEIN 2007), entre otros.

En la Ilustración 53 vemos un ejemplo de extracción de un plano, *RANSAC plane*, basado en los algoritmos planteados en RANSAC Tool box for Matlab™ & Octave, optimizados por (P. KOVESI 2006) y (ZULIANI 2012). El paradigma RANSAC comienza por extraer al azar un mínimo de puntos base sobre los cuales se busca la relación del punto en este caso al plano. En el ejemplo mencionado el número mínimo de puntos para el cálculo de la superficie del plano es de 3, siendo un valor muy inferior para casos de estudio TLS, al buscar ajustar un plano a una nube de millones de puntos y sus respectivas combinaciones, convirtiéndose en valores tan altos que imposibilitan una verificación exhaustiva.

Una solución a esta verificación es elegir un subconjunto de puntos no afectados de errores importantes, que permitan obtener un ajuste correcto. Para ello se tiene en cuenta la probabilidad (*P)*, al coger al menos una muestra con todos los puntos no erróneos en relación al número total de observaciones, el número mínimo de puntos para el cálculo (*p*), de la fracción de observaciones que pueden ser valores atípicos (outliers ε), y del número de pruebas seleccionadas de forma aleatoria (m). Dicha probabilidad se puede calcular mediante la siguiente fórmula (F. BUILL, Caracterización geométrica con técnicas ópticas 3D aplicadas al modernismo en Cataluña 2009):

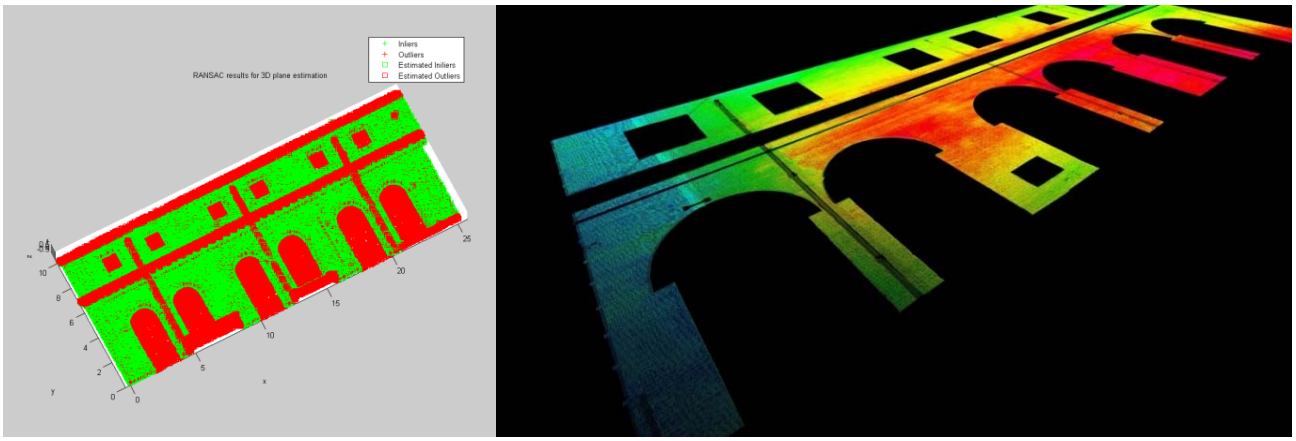
Ecuación 2: Número mínimo para el cálculo de un plano RANSAC

$$m = \frac{\log(1-P)}{\log(1-(1-\varepsilon)^p} \qquad \frac{\log(1-0.99)}{\log(1-(1-0.25)^3} = 8.4 \text{ pruebas}$$

Fuente: (F. BUILL, Caracterización geométrica con técnicas ópticas 3D aplicadas al modernismo en Cataluña 2009)

Después de un número de intento en la búsqueda de puntos, la forma en la que se aproxime más a los puntos es extraída y el algoritmo continúa con los puntos siguientes. Las formas resultantes son probadas contra los puntos de los datos para determinar cuántos de los puntos se aproximan a la forma primitiva. A partir de la extracción de estos datos, se procede a calcular la superficie, en busca de encontrar la geometría que define la fachada. Para lograr el promedio se utilizaron diferentes técnicas, en los campos de procesamiento de imágenes y de construcción de mallas, concluyendo que los procesos de mallado permiten un mayor control del promedio de las superficies, con procesos de reducción de ruido en mallas que no modifican los límites de la los datos, y permiten análisis estadísticos en tiempo real.

Ilustración 53: Izquierda extracción de plano de fachada y visualización de puntos extraídos, proceso RANSAC plane, en MATLAB



Fuente: Propia

Detección múltiple RANSAC

La detección del plano mayor llevada a cabo en MATLAB descrita anteriormente es limitada a un único plano, entendiendo que existen algoritmos más complejos en MATLAB que permiten manejar la nube de puntos en elementos Octree o la gestión de la nube de puntos por conjuntos, que facilitan la detección de más planos y la optimización del proceso.

Según (SCHNABEL, WAHL y KLEIN 2007) es deseable que los algoritmos RANSAC utilizados tengan las siguientes propiedades:

- Sean conceptualmente simples, haciéndolas extensibles y fácil de poner en practica
- Que sean generales, les permite ser aplicadas a un rango amplio de propiedades
- Puede manejar datos que contengan más del 50% de puntos atípicos (ROTH y LEVINE 1993)

El proceso planteado por (SCHNABEL, WAHL y KLEIN 2007) parte de la optimización del problema de la función *score*, mediante la iteración del algoritmo propuesto, considerando la nube de puntos como $P=\{p_1,\ldots,p_N\}$, con normales $\{n_1,\ldots,n_N\}$, el algoritmo se define como un conjunto de formas primitivas $\Psi = \{\psi_1,\ldots,\psi_N\}$, con el correspondiente conjunto disjuntos[46] $P_{\psi 1}CP,\ldots,P_{\psi n}CP$ y los puntos restantes $R=P\backslash\{P_{\psi 1,\ldots,P\ \psi n}\}$, similar a (ROTH y LEVINE 1993). Los nuevos candidatos de forma se generan mediante el muestreo al azar de una muestra mínima de subconjuntos *P* (*randomly sampling minimal subsets*). Se encuentran candidatos de los tipos de forma para cada conjunto y todos los candidatos se recogen en un conjunto *C*, posterior a ello los candidatos que se aproximen más se calculan a través de una evaluación *lazy score*. Solo se aceptan los mejores candidatos, si el tamaño de puntos |*m*| (número de puntos) de los candidatos y el resultado del número de candidatos |*C*|, con la probabilidad *P* (|*m*|, |*C*|) no tiene mejor candidato durante un proceso de muestreo alto.

Si el candidato es aceptado los puntos correspondientes Pm se remueven de P y los candidatos Cm generados con los puntos en Pm se eliminan de C. El algoritmo termina cuando *P* (τ, |*C*|), para un tamaño mínimo de τ definido por el usuario.

Equation1: Extracción de formas en la nube de puntos P

```
Ψ←Ø {formas extraídas}
C←Ø {formas candidatas}
repeat
        C←CU newCandidates()
        m←bestCandidate(C)
        if P(|m|, |C|) >pt then
                P←P \Pm {puntos eliminados}
                Ψ ← ΨUm
                C←C \ Cm {elimina candidatos invalidos}
        end if
until P(τ, |C|) >pt
returnΨ
```

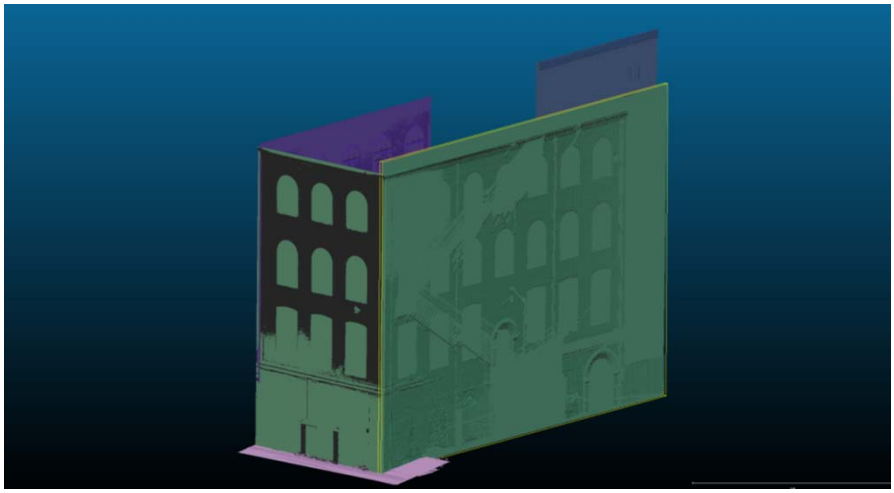
Fuente: (SCHNABEL, WAHL y KLEIN 2007)

En la Ilustración 54 vemos la detección de planos con una épsilon 0.1m, bitmap épsilon 0.1, *normal thresholt* 0,9, con un rango de probabilidad de 10%, desde el programa libre Cloud Compare 2013. En la versión 2015 de este programa los parámetros del algoritmo se explican mejor, siendo una herramienta más intuitiva, en cuanto a los descriptores de sus procesos.

Tiempos de los procesos: Los tiempos de procesamiento obtenidos en MATLAB con RANSAC Tool box for Matlab™ & Octave, fueron del rango de 30 minutos, para 1 millón de puntos, el tiempo con el proceso qRANSAC_SD de (SCHNABEL, WAHL y KLEIN 2007) ronda los dos minutos, en nubes de 50 mil puntos.

[46] Definición de conjuntos disjuntos: http://es.wikipedia.org/wiki/Conjuntos_disjuntos

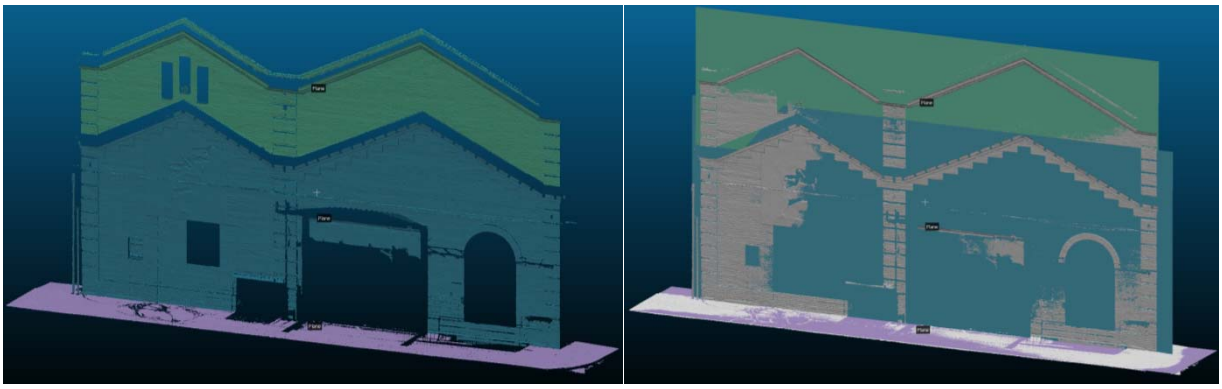
Ilustración 54: Detección de planos múltiples, edificio adjunto a las calderas de Fabra i Coats



Fuente: Propia

En la Ilustración 55 vemos la detección de planos múltiples de una fachada, con una épsilon 0.05m, bitmap épsilon 0.05, *normal thresholt* 0,9, con un rango de probabilidad de 10%, en Cloud Compare 2013.

Ilustración 55: Detección de planos en una fachada de las calderas de Fabra i Coats



Fuente: Propia

3.4 Clasificación arquitectónica, caso de estudio del patrimonio industrial de las Calderas de Fabra i Coats

En el siglo XIX Cataluña ha tenido un papel fundamental en la Revolución Industrial, dejando su huella en la historia, cambiando la estructura de la producción artesanal tradicional a una organización vinculada a la fábrica. Con un progreso urbano y productivo tan rápido e intenso, muchos edificios industriales dejaron de existir, otros continúan abandonados hasta su uso posterior o su derribo. Afortunadamente otros han sido rehabilitados. Hoy en día, estos edificios son parte de la identidad de Cataluña, son parte de la riqueza del patrimonio urbano y arquitectónico de Barcelona, así como una representación de la memoria colectiva (CABALLÉ y R. 2010)

Al ser un edificio que cumple con los valores históricos, artísticos y estéticos, tiene un relevante impacto urbano en la zona donde se ubica. El Ayuntamiento de Barcelona lo compró en 2005, convirtiendo sus principales edificios en un Centro Cultural. Es un grupo de almacenes, actualmente en construcción, con recursos para la creación, la práctica y difusión del arte multidisciplinar y el proyecto emblemático para el programa "Fabriques de Creació".

El levantamiento TLS se centró en la sala central del complejo industrial, construido entre 1910-1920. Se compone de una sala de calderas, sala de instalaciones eléctricas y la sala de bombas hidráulicas. Estas dos últimas salas están ubicadas en la planta baja de un edificio de cuatro niveles. La construcción cuenta con una estructura de ladrillo, con perfiles laminados en inglés como columnas y vigas.

3.4.1 Adquisición de datos TLS

Como paso previo a la clasificación de las nubes de puntos, se plantearon cuestiones técnicas en relación con las características del levantamiento TLS, en este proceso se compararon las características de dos escáneres TLS, en la búsqueda de identificar elementos de detalle en edificios patrimoniales industriales, en relación a los ajustes, los rendimientos y análisis de datos. Estos datos deben tener en cuenta: la densidad de los puntos necesaria para identificar elementos complejos, la distancia óptima para la captura de datos, el ángulo de incidencia TLS en zonas estrechas y las oclusiones en ambientes complejos, teniendo en cuenta las diferentes características los instrumentos utilizados.

El estudio del interior de Fabra i Coats se realizó con dos escáneres de alta precisión:

- El primero se basa en un principio de tiempo de vuelo, el Riegl z420i, con un campo de visión de 360 º H * 80 º V, precisión de 10 mm y un rango de captura que va de los 2 m hasta 250 m, 1,5 millones de puntos entre 5-10min de exploración, con una resolución angular de 0,1 º.
- El segundo escáner se basa en el desplazamiento de fase, el Faro Focus^{3D}, este sistema de escáner permite un mayor campo de visión 360 º H * 305 º V, con una precisión de 0,6 mm en un alcance de 10 m, o 0,95 mm a 25 m (longitud de onda en 905nm), con un error de distancia sistemática ≤ ± 2 mm a 25 m, con una cámara integrada adquiere un panorama con 70 megapíxeles (F. REMONDINO, Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning 2011), recoge 38 millones de puntos en 5-10min de escaneo a una resolución de 1/8.

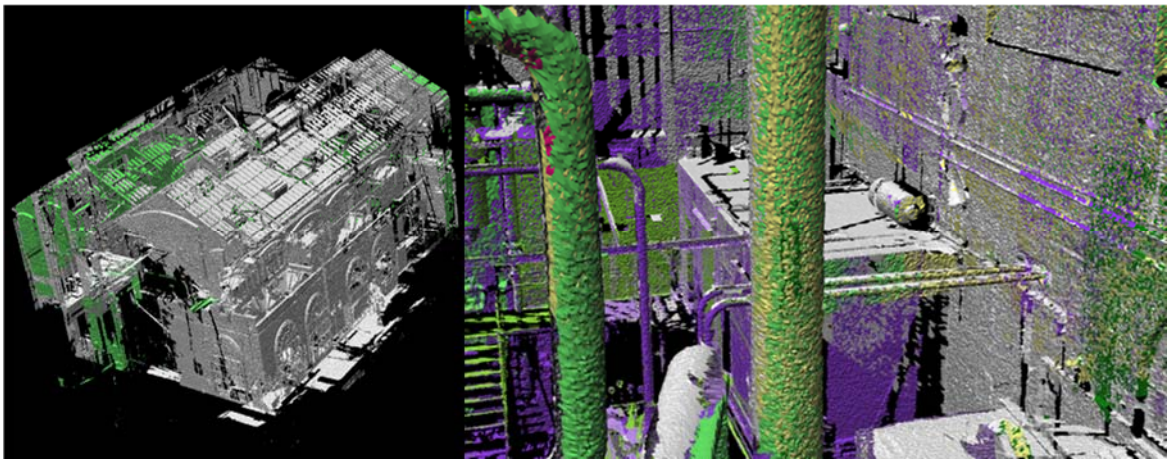
La densidad de puntos de cada levantamiento depende del número de posiciones y la resolución preestablecida. En el proceso de clasificación la unión entre posiciones TLS es la clave del proceso, ya que los elementos de menor medida deben ser identificables, sin duplicidades o errores groseros, incluyendo los cables o las lámparas, ya que se pretende clasificar de forma independiente cada elemento.

Para esta unión se utilizó el método ICP, la cual permitió realizar una validación de la unión en cada etapa del registro (entre posiciones en un orden preestablecido) y al mismo tiempo realizar un ajuste de unión fino en el global del proyecto. Este proceso permite un gran nivel de precisión, ya que considera en el cálculo toda la información de los datos adquiridos, en lugar de sólo un número

limitado de puntos. La principal ventaja del método ICP es su capacidad de unir posiciones con independencia de la naturaleza de los datos geométricos (puntos, grids, superficies con diferentes grados de curvatura, etc.).

Se basa en la minimización de la distancia entre dos nubes de puntos, punto por punto, por iteraciones sucesivas, tomando como referencia una proporción de puntos a analizar cada vez mayor a medida que los elementos son más cercanos, al igual que afinando la precisión en este proceso. Las principales desventajas de este proceso en su forma original, es la convergencia a un mínimo que puede ser falsa, especialmente cuando los datos contienen una gran cantidad de ruido, y que se necesita un número de iteraciones muy alto para la convergencia del modelo. La densidad de puntos vuelve más complejo este proceso, en el modelo de nubes de puntos del Faro Focus^{3D} se obtuvieron 1.300 millones de puntos, en 82 posiciones de barrido, y en el Riegl se obtuvieron 45 millones de puntos en 16 posiciones de escaneado, Ilustración 56.

Ilustración 56: Unión entre posiciones proceso iterativo ICP



Fuente: Propia

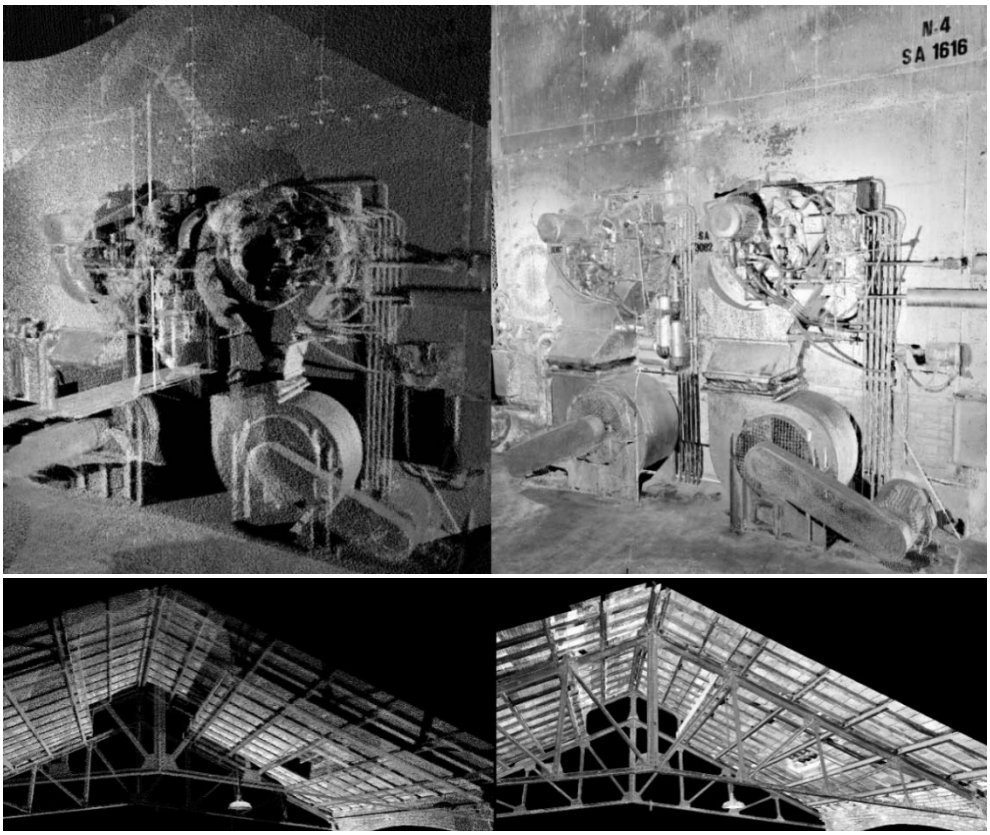
La primera comparación entre los dos levantamientos es el número final de puntos por centímetro cuadrado. Los datos Riegl se adquirieron con un ángulo de 0,1 º, concluyendo con 1,5 millones de puntos por barrido. El levantamiento con el Faro con una resolución de 1/8 y 4x de calidad permitió generar nubes de 38 millones de puntos por barrido. La Ilustración 57 muestra una comparación directa entre los instrumentos, escaneado a la misma distancia, a unos 2,5 m del centro de una caldera para cada escáner, con una resolución de 0.5-2mm con el faro Focus^{3D} y un 5-10mm con el Riegl z420i.

Las diferencias entre las nubes de puntos comparadas no son únicamente la resolución, sino también las oclusiones que se presentan en cada instrumento. La accesibilidad entre las calderas, las diferentes alturas, la complejidad de la distribución de tuberías permite un número limitado de posiciones de barrido, ello tiene una relación directa con las áreas ocluidas o sin escanear de cada modelo (Ilustración 57). El modelo de nube de puntos final tiene una resolución media de 0,2 mm con el faro, y de 1 cm con el Riegl.

La densidad de los puntos de cambia entre el interior y el exterior en los dos levantamientos:

- En relación a la distancia del escáner y de la complejidad del espacio-objeto, la distancia de exploración en el exterior con el Faro y Riegl varió entre 4 a 7 metros en relación al objeto escaneado, con ello se buscó generar una nube de puntos homogénea.
- En el interior del edificio, las distancias variaron significativamente entre los objetos. La Ilustración 58 muestra algunos de los problemas típicos que nos enfrentamos en los levantamientos industriales, esta imagen representa una sección en planta de la nube de puntos, el Riegl con un alto porcentaje de zonas ocluidas, dado el limite angular de 80 º en el eje vertical del instrumento, impidiendo la documentación completa de toda la edificación. Por otra parte, el escáner Faro se tiene un ángulo vertical de 305 º en la adquisición de datos, que cubre todos los elementos del edificio al aumentar su ángulo de visión, reduciendo al mínimo las zonas ocluidas y el traslape entre posiciones, también influye en el tiempo de adquisición de datos y facilita un adecuado plan de trabajo en el proceso de escaneo, al minimizar el número de posiciones, errores causados por el ángulo de incidencia, al igual que minimizar problemas relacionados a la normal[47], lo que permite una mejor iluminación usando la información normal.

Ilustración 57: Comparación de resolución entre el Riegl z420i (izquierda) y el Faro Focus^{3D} (derecha)



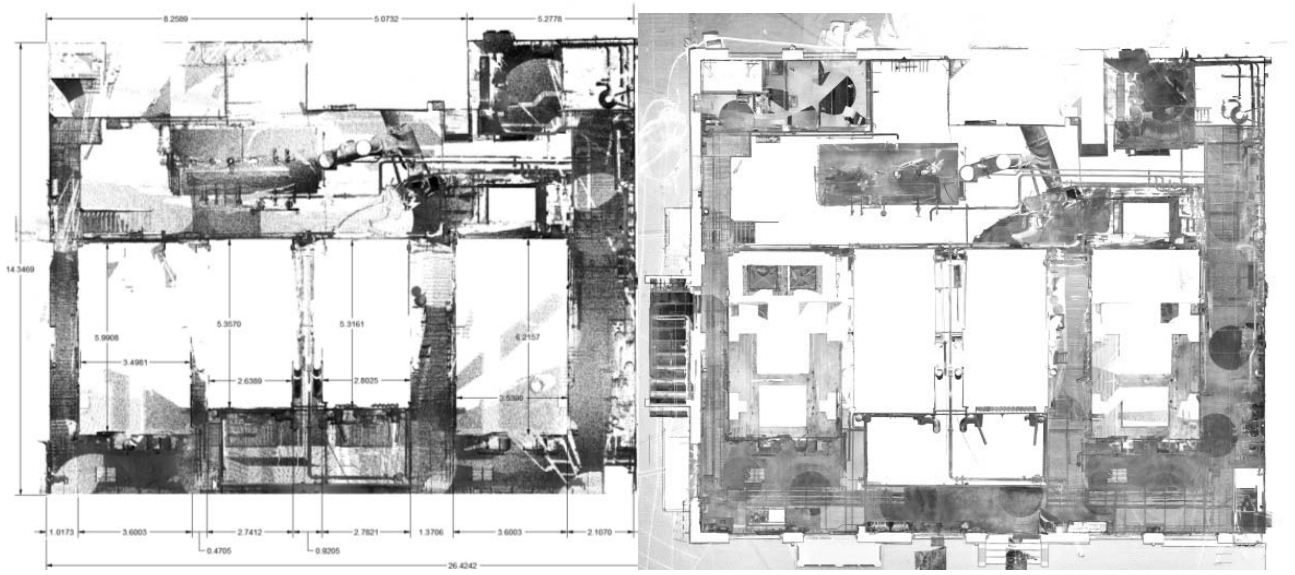
Fuente: Propia

En el proceso de recopilación de datos las condiciones de iluminación ambientales fueron diferentes entre los dos escáneres, por ejemplo en el sótano no había luz directa, única iluminación indirecta (especular), esto afectó a la información de la intensidad en el escáner de cambio de fase (Faro),

[47] Dirección de los puntos en relación a la geometría

visualmente este error produce un cambio de rango de intensidad entre las posiciones TLS, este problema se corrigió usando un proceso llamado "*Equal Fall off Compensation",* en el que se escala la información de intensidad a una distancia concreta, en este caso de 20 metros para cada posición, utilizando esta misma distancia para el filtro de intensidad, ajustando la escala de los valores de intensidad a un rango de 20 metros, para cada posición, homogenizando este información entre posiciones, esto también significa que la información fuera de este rango no tendrá un valor de intensidad, ya que estará fuera de la escala y se reemplazara su valor por un valor falso, por ello las nubes de puntos tienen que ser recortadas o filtradas a la misma distancia de los filtros utilizados. El rango utilizado para las técnicas de filtrado dependen de la calidad de los datos y las distancias en el espacio. El Riegl no mostró ningún cambio significativo en el valor de la intensidad, en comparación al Faro.

Ilustración 58: Ortoimágenes arquitectónicas, comparativa entre Riegl z420i (izquierda) y el Faro Focus3D (derecha)



Fuente: Propia

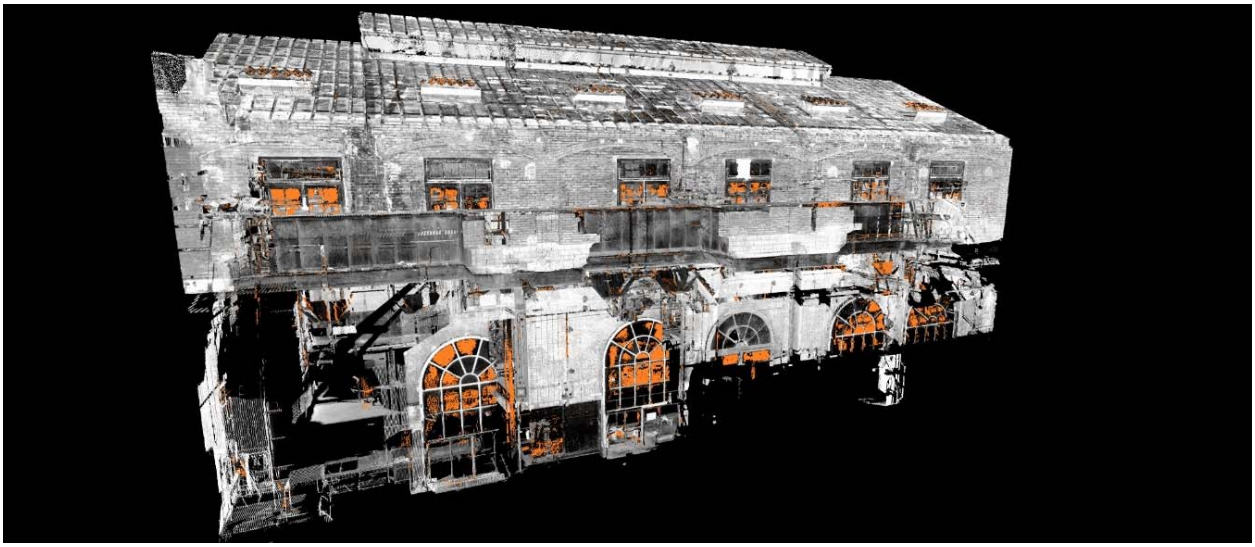
3.4.2 Metodología de clasificación y segmentación

El primer paso de la clasificación fue la limpieza de la nube, se consideró que las intensidades menores de 0.25db con una tolerancia de 20% son ruido, causado por una reflectancia muy alta, como lo son las zonas de cristales y errores causados por proximidad de objetos que generaron ruido en las proyecciones lejanas. Estos valores se determinaron mediante pruebas consecutivas sobre la selección de información del modelo y la verificación posterior, como se ve en la Ilustración 59.

Por último se realizaron procesos de limpieza automáticos, basados en procesos de limpieza de escáneres láser aéreos LiDAR (Light Detection and Ranging): Filtro de puntos aislados del promedio de la nube de puntos, filtro de grupos de puntos fuera del promedio de la nube de puntos predefinido, llegando a un total de 917.111.719 puntos, como información preliminar, antes de comenzar los procesos de clasificación.

Al ser un modelo complejo y con una densidad de puntos de 1.300 millones de puntos en un volumen de 7.000 m³, requirió una metodología singular, limitando los procesos automáticos, e incluyendo un postproceso en su mayoría manual. Este proceso comienza con la segmentación por plantas, esta reorganización por niveles se realizó en relación a su altura, utilizando la herramienta de *clipbox del Pointools*[48], con ello se divide la nube en tres archivos, al mismo tiempo dividido por día escaneado, en relación a los tres niveles.

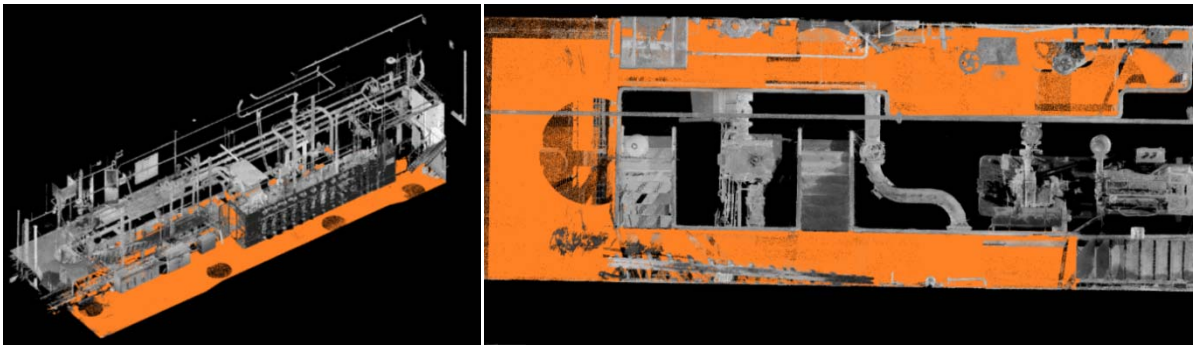
Ilustración 59: Selección por intensidad en procesos de limpieza de la nube de puntos



Fuente: Propia

Con estos archivos de menor tamaño se comenzó el proceso de identificación de elementos arquitectónicos, partiendo de la segmentación de la información del suelo, a partir de un proceso semiautomático RANSAC, lo cual permitió separar con mayor facilidad los muros en relación al suelo, al mismo tiempo permitió identificar los límites entre los motores de las calderas entre los niveles. Para reducir el tiempo de procesamiento en la clasificación, se extrajo una zona de suelo con la herramienta *clip box*, reduciendo la información a calcular con el proceso RANSAC en Matlab, Ilustración 60.

Ilustración 60: Clasificación del suelo RANSAC



Fuente: Propia

[48] Programa de visualización de nubes de puntos.www.pointools.com

Para la selección de los muros se utilizó el programa *pointools Edit*[49] de forma manual, seleccionando los elementos verticales desde la vista ortogonal de planta, esta visión permitió dividir las tuberías de los muros, al verse en orto los muros como líneas, con ello dividiendo esta información en dos capas y con la comprobación visual del proceso en perspectiva. El mismo proceso se repitió de la información que contiene la pared y las calderas, los tubos y la maquinaria.

La segmentación de la relación techo – pared – estructura requirió una segmentación manual con un grado de interpretación alto, ya que estos elementos se mezclan y en determinados puntos se pueden considerar de una u otra categoría, por ejemplo una viga estructural puede ser considerado como elemento de soporte, una parte de la cubierta o del muro perimetral.

3.4.3 Clasificación en relación a la evolución histórica, la función y el programa arquitectónico

Con el fin de facilitar la comprensión del edificio patrimonial se realizó una clasificación basada en características arquitectónicas, en un proceso de interpretación basado en el conocimiento de las características del edificio (Ilustración 61), teniendo en cuenta las siguientes variables:

- El desarrollo histórico: la integración de las diferentes calderas, los cambios en el edificio, la evolución o modificación de las máquinas.
- La función: Calderas de carbón, calderas de gas, sistema eléctrico, sistema hidráulico
- Programa arquitectónico: zonas se dividieron por las diferentes actividades

La clasificación del edificio patrimonial requiere tanto una clasificación por la forma arquitectónica, como también la evolución histórica de las maquinarias y como estas modificaron la fábrica textil. La clasificación fue en su mayoría un proceso manual, utilizando las herramientas de *Pointools Edit.*

Las calderas se clasificaron en relación a su evolución histórica, comenzando con las calderas (N2 y N3), alimentadas de carbón a mano por operarios, posteriormente se introdujo un sistema de tolvas para servir de carbón a las calderas, la cual necesito una estructura metálica paralela a la del edificio. Posteriormente las calderas fueron alteradas para alimentarlas de gas, con la adición de un quemador y un acumulador de vapor en la parte superior.

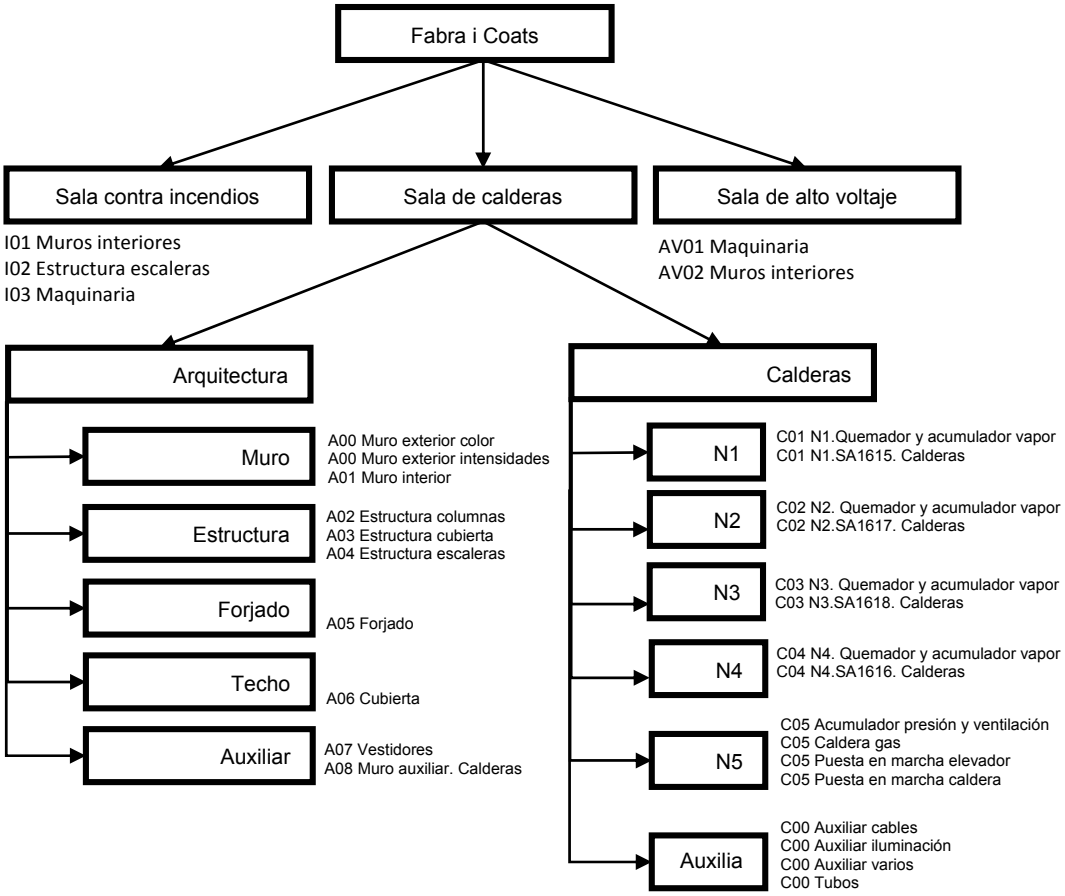
La introducción de dos nuevas calderas (N4 y N1), forzó una expansión arquitectónica, la altura del techo y las paredes se elevaron 3 metros, llegando a una distancia final de 10 m de altura en el punto más bajo. Las nuevas calderas de gas se elevan con respecto a los anteriores, desde el suelo a 3 metros con el fin de facilitar la limpieza del carbón por gravedad. La última caldera (N5) se introdujo en el edificio al hacer una abertura en una pared en la fachada izquierda en relación al acceso de las salas, esta tiene un depósito más pequeño y no requiere el desmontaje de la cubierta para la instalación, funcionaba con gas.

Los sistemas de ventilación asociados con las calderas se modificaron con el tiempo, al comienzo con una chimenea de ladrillos, del doble de altura que los restos de la chimenea actual, esta chimenea fue remplazada por un sistema de tuberías metálicas, con salida directa por el techo.

[49] Programa de edición de nubes de puntos. www.pointools.com

Los sistemas de ventilación asociados a las calderas fueron modificados en el tiempo, dejando en la parte exterior del complejo una chimenea de ladrillo y otras metálicas. Complementario a este sistema hay dos sistemas paralelos, uno eléctrico y uno hidráulico, que servía para distribuir el vapor de las calderas como agua caliente al resto de edificios y como sistema de prevención de incendios. Estos combinados con las calderas, generan una compleja trama de conductos y máquinas auxiliares, que se distribuye por los muros y se conectan en la parte superior con las calderas.

Ilustración 61: Estructura de la base de datos (31 partes)

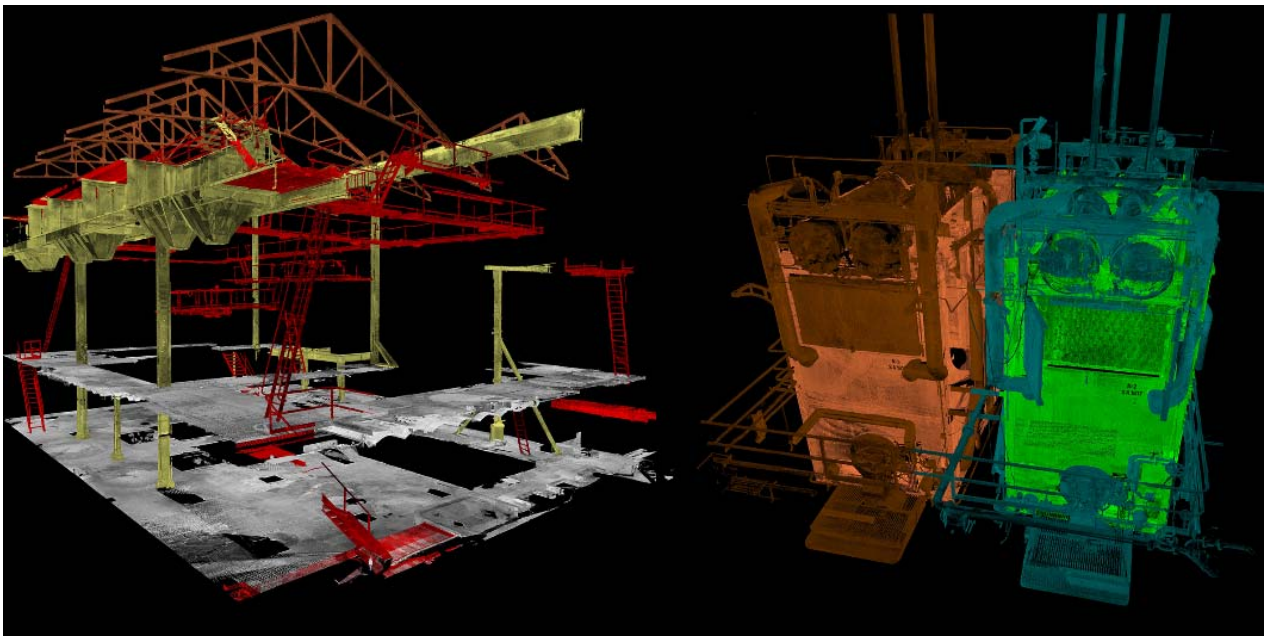


Fuente: Propia

La arquitectura industrial está en estrecha relación con estas máquinas y los espació para su operación, por ejemplo en el sótano la maquinaria se relaciona con los almacenes, en los pisos superiores con un marco de metal para la circulación (Ilustración 62), que llega al punto más alto de las máquinas, llegando al techo, por medio de una estructura de cerchas y pilares metálicos, empleados en la rehabilitación de esta zona patrimonial.

En general, la estructura de datos representada anteriormente, los espacios principales son la sala de calderas, la sala de alta tensión y la sala de sistema contra incendios, este último es considerado como una innovación importante en la revolución industrial de Cataluña.

Ilustración 62: Temáticos de circulación y de las calderas



Fuente: Propia

3.4.4 Difusión del Patrimonio: el modelo virtual

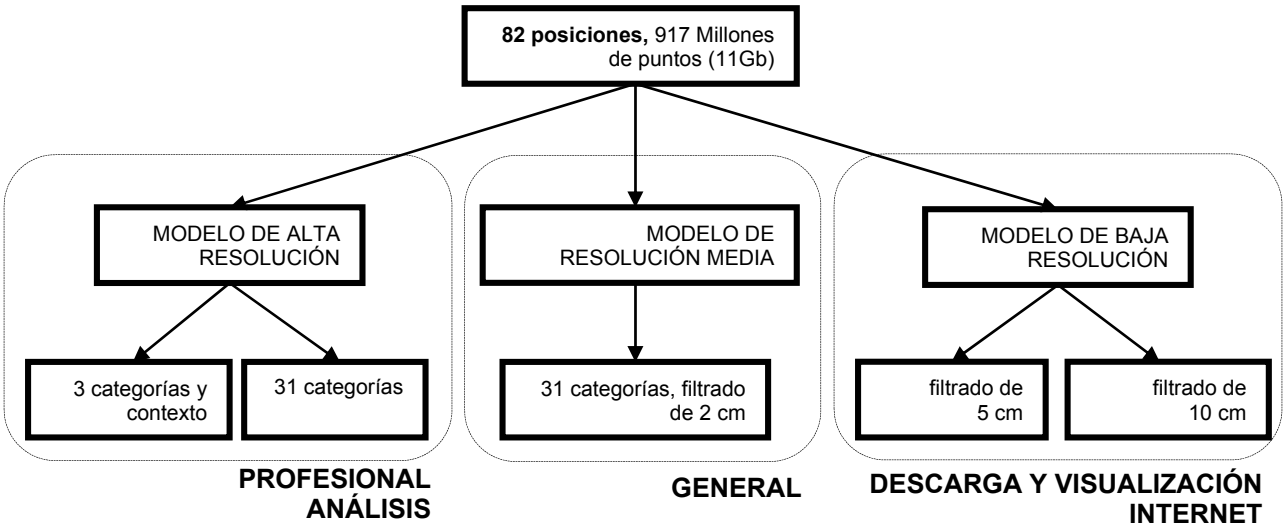
La parte final del proceso es una difusión adecuada de la información, por elementos concretos, que reunidos integran el conjunto arquitectónico a industrial. A su vez hemos dividido el modelo clasificado final, en tres categorías: un modelo para los usuarios especializados, un modelo para los usuarios en general y un modelo para los usuarios en masa (Ilustración 63).

- Modelo de alta resolución: Esta información es la información básica para el análisis científico-histórica y la documentación histórica, con una resolución de 1 punto cada 3 milímetros, como promedio de resolución máximo que alcanza el instrumento con los parámetros usados. Esta información requiere procesos especiales para su manipulación dado el tamaño de los ficheros, aun así es la base fiable para especialistas en patrimonio, que requieren información detallada para sus análisis, que a su vez incluyan nuevas tecnologías y procesos especializados para profundizar en el conocimiento de las partes del edificio, de las características de material (en análisis de la alteración del material y del objeto a través del tiempo), también para estudios estructurales (como deformaciones o el aislar partes de las estructuras para introducirlas en programas de cálculo estructural). Lo cual genera nuevas oportunidades de investigación del estado actual y la evolución del patrimonio, en términos técnicos.
- Modelo de resolución media: Este modelo permite la exploración de todo el edificio en archivos de tamaños accesibles, para los usuarios no especializados. La estructura de la clasificación se mantiene para la accesibilidad de los datos. Esta información está orientado a los usuarios que trabajan constantemente con este edificio. En este caso, el *Museu*

d'Història de la Ciutat de Barcelona (MHCB) y amigos de Fabra i Coats, que administra el edificio.

- Modelo de baja resolución: Este modelo se hace con fines de difusión por Internet, en el proceso de construcción de un edificio museo virtual en línea (Ilustración 64 derecha). Con distancias de 5 y 10 cm entre puntos, son archivos sin clasificación, que se utilizan principalmente para la navegación por internet, como herramienta de difusión.

Ilustración 63: Manejo de archivos para su difusión



Fuente: Propia

Para tal fin se introducen los navegadores de nubes de puntos en la web, cada vez existe una mayor oferta de estos, tales como cloudcaster[51] o XB point stream[52], ellos permiten la navegación y medición, en un plataformas con interfaces sencillas. Complementario a los programas de visualización web recomendamos programas libres, para tratar estos archivos como, MeshLab[53] y Cloud Compare, en principio para fines de visualización, difusión y para procesos de análisis de las nueves de puntos, y su transformación en otras entidades, como las mallas.

Conclusiones de la comparación realizada

La comparación de los dos escáneres determino que el Riegl no es un escáner adecuado para interiores detallados, en rangos de entre de 2 a 10 m, es necesario un mayor número de puntos por posición para llegar a un nivel de detalle que permita la clasificación de la información TLS en interiores industriales. Por otro lado, la portabilidad de Faro y la adquisición de un gran número de puntos en un menor período de tiempo lo posicionan como una herramienta adecuada para levantamientos de interiores, llegando a resoluciones de una medida cada 0,5 cm como media, necesaria para extraer detalles de objetos.

[51] Visualizador de nubes de punto de alta resolución *cloudcasterlite.com*
[52] Herramienta de JavaScript que emula el visualizador Arius3D's PointStream. *https://github.com/asalga/XB-PointStream*
[53] Meshlab es un programa de fuente abierta que permite realizar procesos sobre nubes de puntos y también trabaja con mallas, triangulando la información TLS. También es un programa complementario de construcción de modelos de nubes de puntos a través de fotografías. meshlab.sourceforge.net.

Los cambios en las condiciones de iluminación afectan directamente el valor de intensidad del escáner Faro, así como la distancia a los objetos, sumado con la falta de calibración del TLS, que limita su utilización como una base de datos. El valor de la intensidad del Riegl z420i no tiene una afectación en relación a las condiciones de iluminación, pero si se ve afectado por la distancia a los objetos y por no estar calibrada el valor de intensidad a un fin específico. La cámara incorporada del Faro tiene un control limitado desde el usuario en la toma de datos, en ciertos casos generando información RGB con un nivel de error alto, el valor RGB es importante, ya que permite la adecuada lectura de la información aparte de las características geométricas del levantamiento.

La obtención de un modelo de nube de puntos de alta densidad es hoy en día una tarea bastante simple. La discusión debe centrarse en dos aspectos principales: la forma en que se debe subdividir, para un uso ágil y adecuado, y como deben ser distribuidos los archivos para diferentes usuarios y en diferentes aplicaciones.

La subdivisión del modelo presentado está lejos de ser un proceso de clasificación automático, ya que tiene que responder a factores históricos, arquitectónicos o de la necesidad de un programa que lo defina. Este paso es necesario, ya que añade accesibilidad a la información del modelo. Por otra parte, diferentes resoluciones son necesarias para la accesibilidad de distintos usuarios.

Ilustración 64: Densidad de puntos y resolución alcanzada

Fuente: Propia

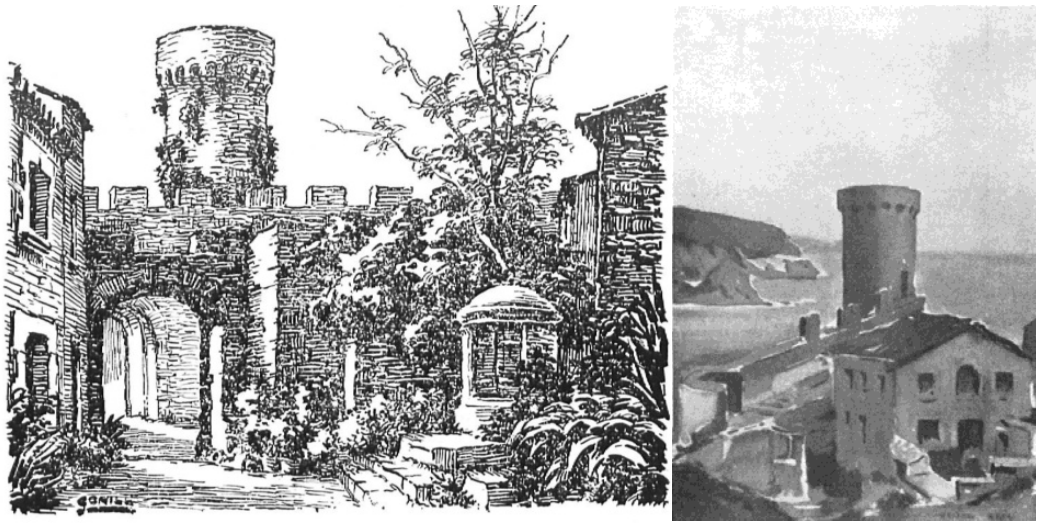
3.5 Clasificación Urbana, caso de estudio del casco histórico de Tossa de Mar, Vila Vella

Declarado monumento histórico-artístico nacional en el año 1931, siendo el único ejemplo de población medieval fortificada que todavía existe en el litoral catalán. En su momento de máximo esplendor (s. XV) la Vila Vella integraba unas ochenta casas. La mayoría de éstas aprovecharon el muro de la muralla como pared de fondo. A partir del s. XVI la población se empezó a expandir fuera

de la muralla y se levantaron las primeras edificaciones en el barrio de san Roqueta y a lo largo del camino real.

El estado de conservación actual responde a diversas restauraciones, especialmente a finales del s. XIV y durante el s. XVIII, manteniendo el perímetro original con muros almenados, que se distribuyen en cuatro torreones y tres torres cilíndricas rematadas por matacanes. Las torres más conocidas (Ilustración 65) son la *torre d'en Joanàs*, que preside la bahía; la torre de las Horas, situada a la entrada del patio de armas, que debe su nombre a que era el único lugar donde se situó un reloj público y la torre de es *Codolar*, también conocida como la torre del Homenaje, que preside la playa de *Codolar,* Ilustración 66.

Ilustración 65: Patio de armas de la "Vila Vella" y torre de les Hores (pintura al óleo de Jacinto Conill) y "Silueta de la torre vigilante como testimonio de los peligros que acechaban desde el mar"



Fuente: Pintura de Jacinto Conill (OLIVA 2008) y pintura de Ramón Reig (RODEJA 1960)

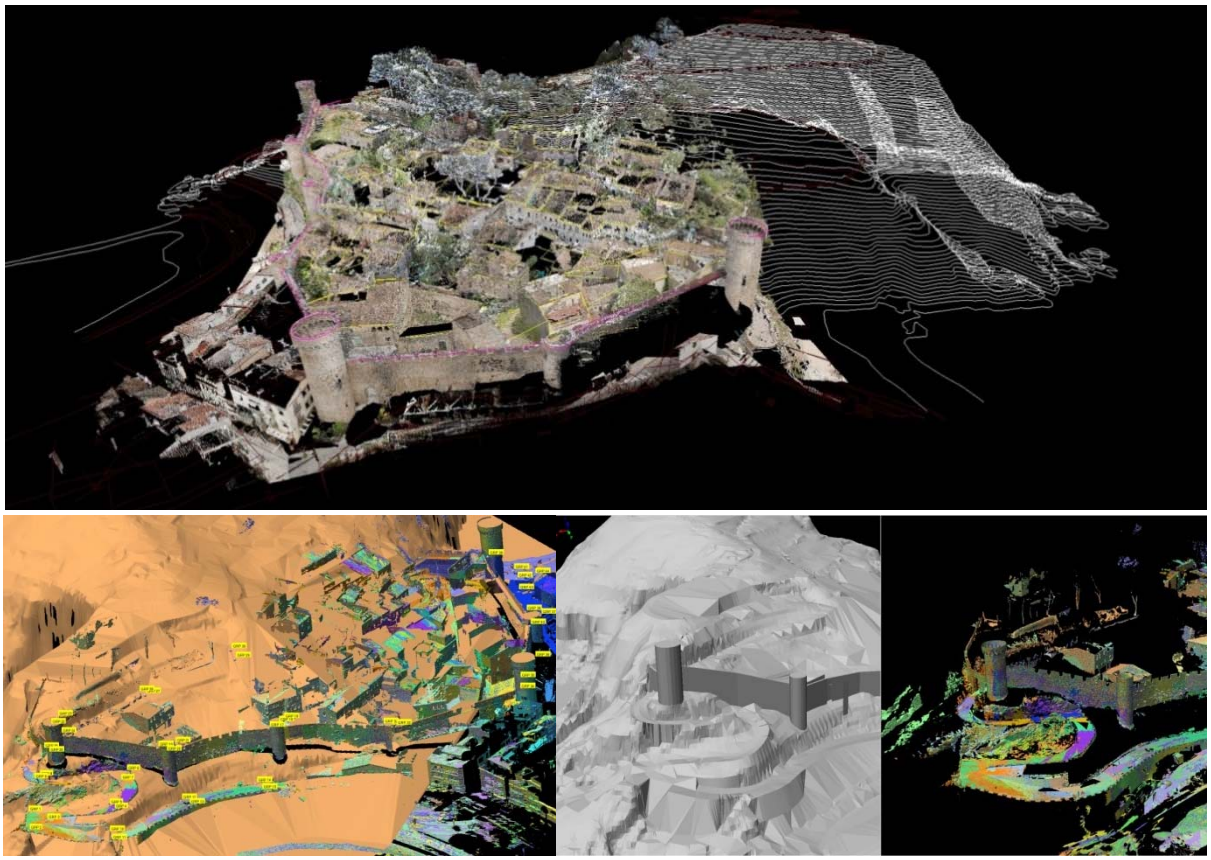
Ilustración 66: Estado actual, complejidad urbana

Fuente: Propia

3.5.1 Georreferenciación y verticalidad basada en el ICC

Existen amplias bases de datos cartográficas de Vila Vella, ejemplo de ello son las bases de datos que se pueden descargar desde internet como: Información de planeamiento (Zonas de Vila Vella), Cartografía WMS del Catastro (Dirección General del Catastro 2010), datos de trasporte (ejemplo Open Street Map), datos a nivel de barrio (Goolzoom 2010), etc. Algunas de estas bases están respaldadas por organismos nacionales como lo es el *Institut Cartogràfic de Catalunya* ICC. En el caso de Vila Vella se utilizó la cartografía 1:1.000 del ICC[54], para la georreferenciar y corregir el nivel topográfico, Ilustración 67.

Ilustración 67: Georreferenciación e información complementaria al levantamiento (TLS 150 de control entre la información ICC - TLS)



Fuente: Propia

Al realizar una comprobación de esta información con la unión preliminar de Vila Vella, se identificaron puntos en común: el nivel de vías, la topografía y la geometría de la muralla, por lo contrario las escaleras son diferentes a las registradas en el 2008 y los vectores de las casas en 3D no corresponden a bordes reales de las edificaciones, siendo estos la unión de puntos topográficos de planos que no se relacionan como superficie (en cuanto a la unión de los vectores).

[54]Proyecto 08,09-2004 código 00119771600, formato: SHP 3D, fecha vuelo: Agosto de 2004, fecha de revisión de campo Diciembre de 2005 http://www.icc.cat/cat/Home-ICC/Inici/Cartografia/Documentacio/Especificacions-tecniques

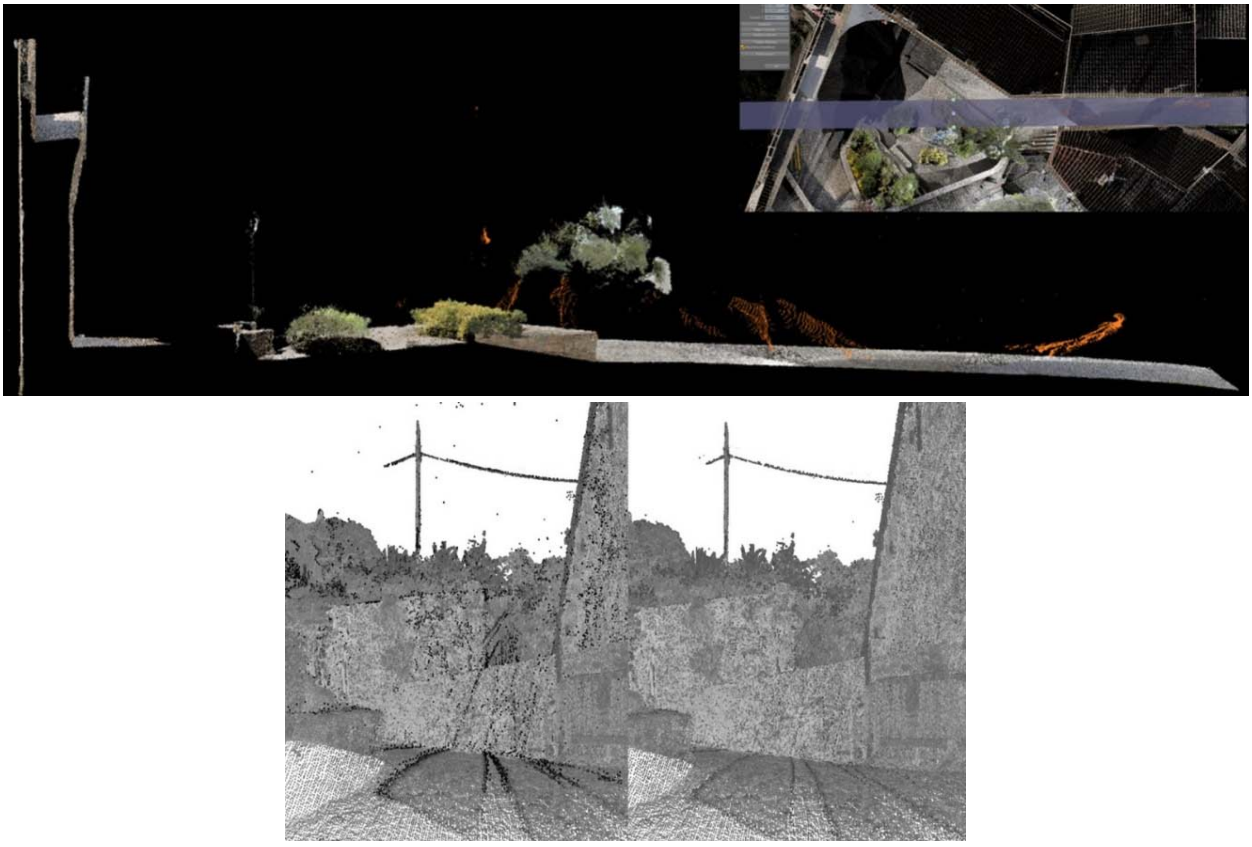
La georreferenciación a esta información se logra a partir de la comparación de mallas. Las curvas de nivel y las vías se convirtieron en una malla y los vectores de la muralla y torres se convirtieron en volúmenes proyectados hasta el terreno. Paralelo a ello se realizó la unión de todas las posiciones del TLS entre ellas, logrando tener dos modelos, uno fijo que sería el basado en el ICC y el TLS que se roto y traslado utilizando 150 puntos coincidentes a la información del ICC, Ilustración 67. Este proceso permitió corregir tanto la verticalidad como la rotación y llenar vacíos de información con los datos del ICC, dadas las características topográficas de montaña y por la vegetación.

3.5.2 Limpieza de las nubes de puntos

Los procesos de limpieza automáticos y manuales no eliminan la totalidad de la información no deseada, por ello y dada la necesidad de tener un modelo sin ruido, para el futuro análisis de la información, se realizaron tres etapas de limpieza. El primer proceso es manual por posición de escaneo, eliminando el ruido de elementos en movimiento y recortando los datos a una distancia de 50 metros de radio, buscando facilitar el registro.

Al ser esta limpieza por posición es difícil identificar objetos en la nube de puntos a distancias mayores a 15m, con el escáner Riegl z420i. Por ello se procedió a una segunda etapa de limpieza una vez unidas las posiciones TLS, como se ve en la Ilustración 68.

Ilustración 68: Superior segunda limpieza manual, inferior limpieza de la información de intensidades. Izquierda información inicial y derecha sin los rangos de intensidad predefinidos



Fuente: Propia

Esta limpieza requiere criterios preliminares que dependen del proyecto en que se trabaja, por los objetivos planteados, por su extensión y su complejidad volumétrica, al extraer datos por zonas de trabajo, que al unirse deben ser iguales, por ejemplo se consideró ruido la información interior de las viviendas, registradas indirectamente.

Para realizar esta segunda limpieza, se procede a hacer un barrido de forma ortogonal cada 2 metros, de todo el modelo unido, exportando esta información como otra nube de puntos, Ilustración 68, permitiendo una limpieza manual más efectiva, al tener mejor resolución con todas las posiciones, siendo negativo para este proceso el tiempo que requiere.

Complementario a esto, y de forma semiautomática, se disminuyó el ruido mediante la selección de un rango de intensidad, extrayendo a un archivo complementario cierta información considerada ruido, entre 0.03 a 0.4db, con una tolerancia de 30%. Estos valores se determinaron mediante pruebas consecutivas sobre la selección de información del modelo y la verificación posterior, siendo el ruido de intensidad un archivo de 11’321.000 puntos de un total de 317’790.208 puntos, sin llegar a afectar los principales materiales del entorno medieval, al ser en su mayoría de baja reflectancia.

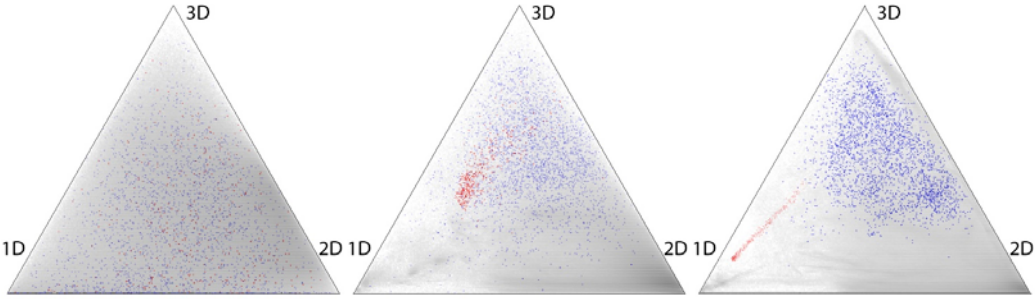
Por último se realizaron procesos de limpieza automáticos, basados en procesos de limpieza de escáneres láser aéreos LiDAR (*Light Detection and Ranging*): Filtro de puntos aislados del promedio de la nube de puntos, filtro de grupos de puntos fuera del promedio de la nube de puntos predefinido, filtro de ruido en el promedio de planos sin suavizado o modificación de datos y reducción de la redundancia con una distancia menor a 1mm.

3.5.3 Clasificación volumétrica espacial

Para la clasificación urbana comenzamos la clasificación con procesos de clasificación de superficies naturales CANUPO, ya que el volumen de información requiere procesos que puedan manipular la información en relación a la escala. Dividiendo el proyecto de escala urbana en zonas de nueves de puntos menores, ya que el análisis de distribución en 3D, 2D y 1D se puede desarrollar en paquetes menores, sin verse afectada la clasificación por dichos recortes, ya que analiza la nube a una escala, en relación a la distribución de puntos de forma local, sin importar el tamaño de la escena clasificada, gracias a las preselecciones *Core Points*.

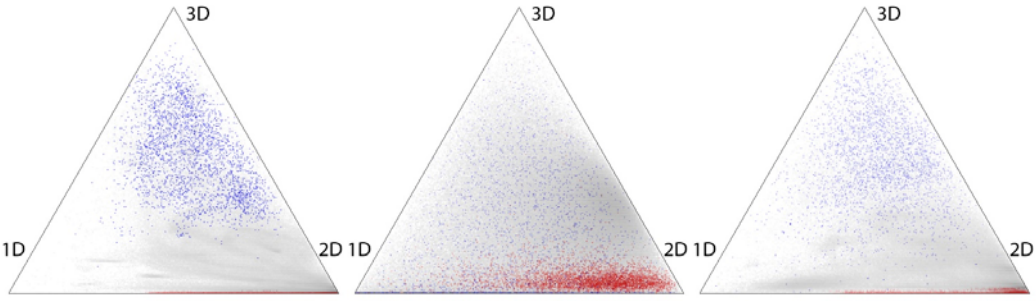
La distribución de los puntos se puede graficar según las escalas, ejemplo de ello es las figuras de la Ilustración 69, en las que se ven estas clasificaciones, en relación a la distribución de los puntos en 3D, 2D y 1D, para escalas de análisis concretas. Este caso ejemplificado es de la distribución de una preselección, de muestras de un radio de 25cm, las imágenes superiores corresponden a: la primera en rojo es un segmento de farola, como muestra de elementos alargados, que se pueden interpretar como 1D, lo cual es evidente en la escala de los 50cm, en azul una muestra de una zona de vegetación, que se puede entender como volumetría 3D, la cual también se entiende correctamente a la escala de los 50cm, a escalas menores estas superficies se confunden, especialmente a escalas de 5cm. Las imágenes inferiores corresponden a la separación de las zonas consideradas volumétricas, en dos, la azul es una zona de vegetación de 25cm de radio, que a escalas pequeñas en rangos de 5cm, se diferencia de las rojas, que corresponden a un plano, extraído de una fachada, estas dos categorías se diferencian principalmente de los 5 a los 25cm.

Ilustración 69: Clasificación *CANUPO* aplicada a entornos urbanos
Elementos alargados (rojo) y elementos volumétricos (azul). En gris la distribución de la nube de puntos de la escena de la Ilustración 70. Escalas entre 5cm a 50cm cada 5cm



Escala 5 cm *Escala 25cm* *Escala 50cm*

Elementos planos (rojo) y elementos volumétricos (azul). En gris la distribución de la nube de puntos de la escena de la Ilustración 70. Escalas entre 5cm a 50cm cada 5cm



Escala 5 cm *Escala 25cm* *Escala 50cm*

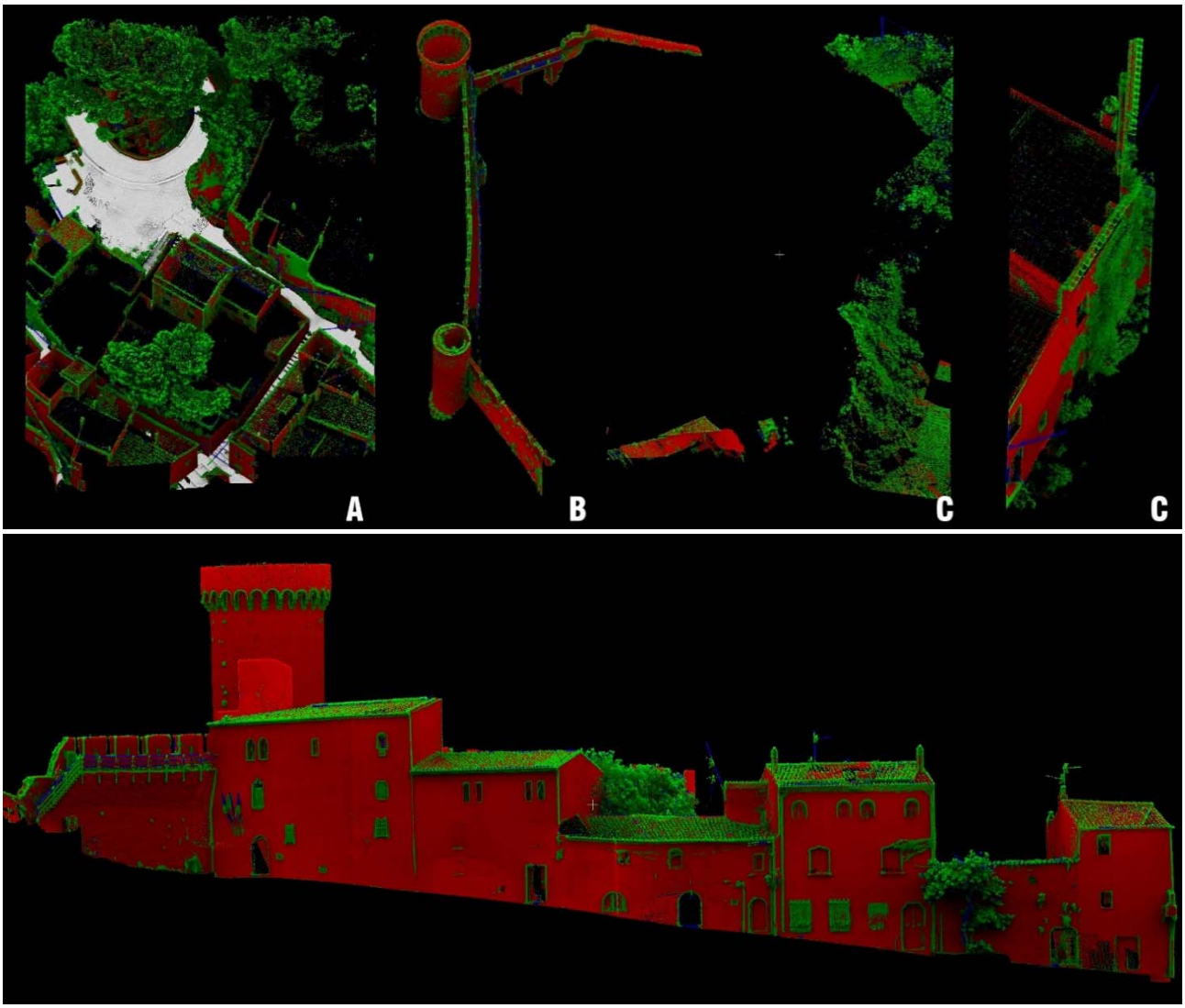
Fuente: Propia

En la Ilustración 70 se ve la aplicación de esta clasificación. La clasificación no se aplicó a la totalidad de la nube de puntos, por el tiempo que consume su procesamiento, en su lugar se unieron todas las posiciones y se exportaron en una cuadricula de 5x5, cada zona menor fue clasificada con el proceso CANUPO, siendo imperceptible la unión entre las nubes de la cuadricula después de aplicar la clasificación, destacando que los procesos aplicados no se ven afectados por la densidad de puntos, la escala del modelo, o los límites del mismo.

En la Ilustración 70 el ejemplo A tiene 50 mil puntos ejemplo de una escena densa y de gran tamaño, el ejemplo B muestra una escena de murallas que tiende a ser alargadas, detectando correctamente los elementos lineales como los pasamanos en la parte superior de la muralla, en la figura C vemos información distante, con poca resolución y una considerable ausencia de datos por zonas por la oclusión a distancia, por último el D muestra un segmento menor de fachada, que se integra perfectamente con clasificaciones de zonas de mayor tamaño.

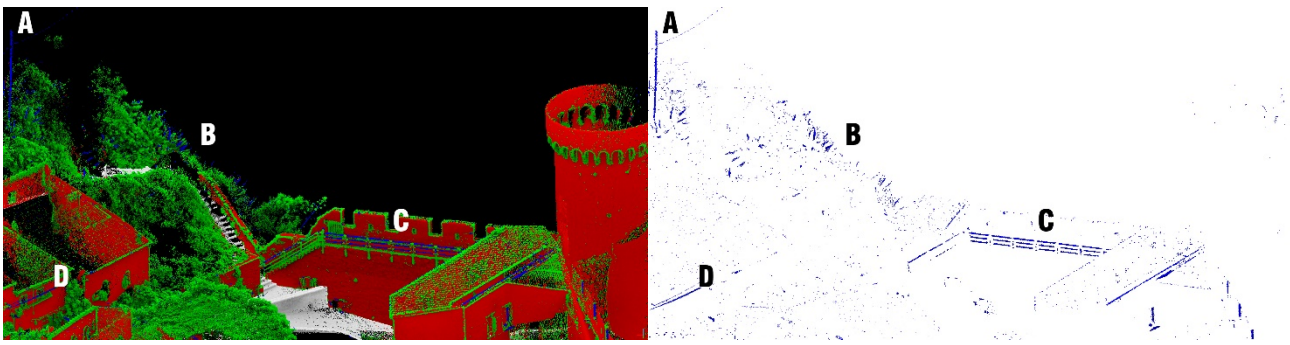
El punto de partida de la clasificación fue encontrar los elementos alargados Ilustración 71, nubes de puntos distribuidas en una dirección, basados en la clasificación ejemplificada en la Ilustración 69.

Ilustración 70: Clasificación CANUPO de diferentes zonas (imagen superior) y unión de 4 zonas (inferior)



Fuente: Propia

Ilustración 71: Clasificación *CANUPO*, entre elementos alargados (azul) y elementos volumétricos (rojo y verde)



A) Postes B) vegetación alargada, C) Pasamanos tubos, D) Cables

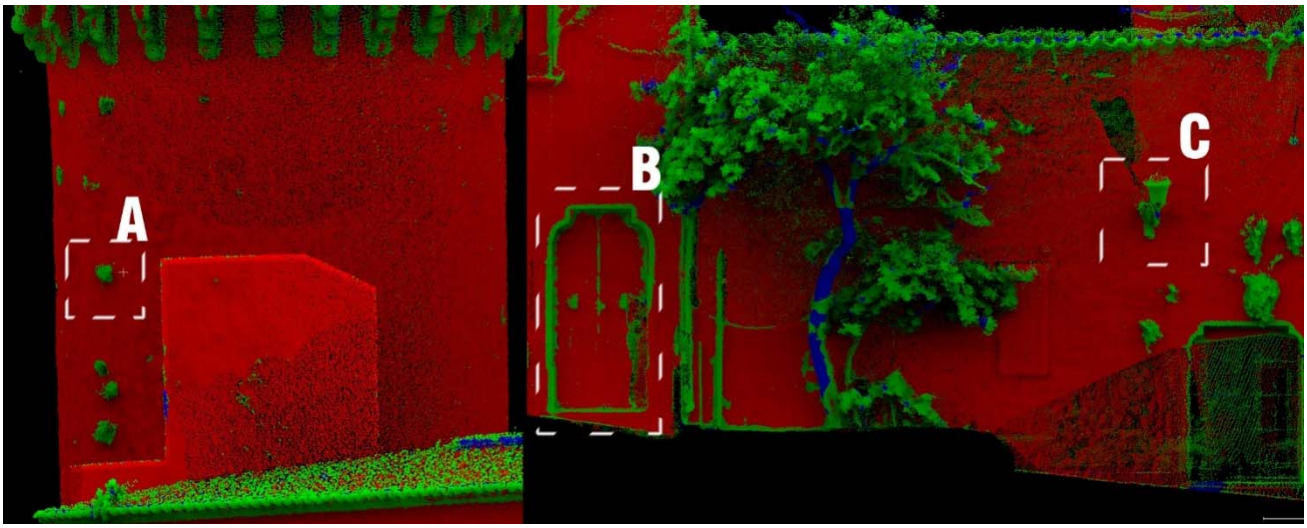
Fuente: Propia

Posterior a ello se procedió a detectar las superficies volumétricas Ilustración 72. El objetivo de partida es la clasificación de elementos genéricos, planteando la posible sub segmentación en relación a usos concretos. Los elementos genéricos predefinidos se basan en tres premisas:

- Elementos urbanos: Los tubos, pasamanos, cables y ramas tienden a ser más lineales que volumétricos
- Fachadas y muralla: Las fachadas tienden a ser superficies planas

Vegetación y carpintería: La vegetación y los detalles de fachada tienden a tener una distribución volumétrica, Ilustración 73.

Ilustración 72: Elementos identificados en fachadas. A) Vegetación adosada a las fachadas (muralla), B) Puertas y ventanas, C) Elementos *urbanos (farola)*

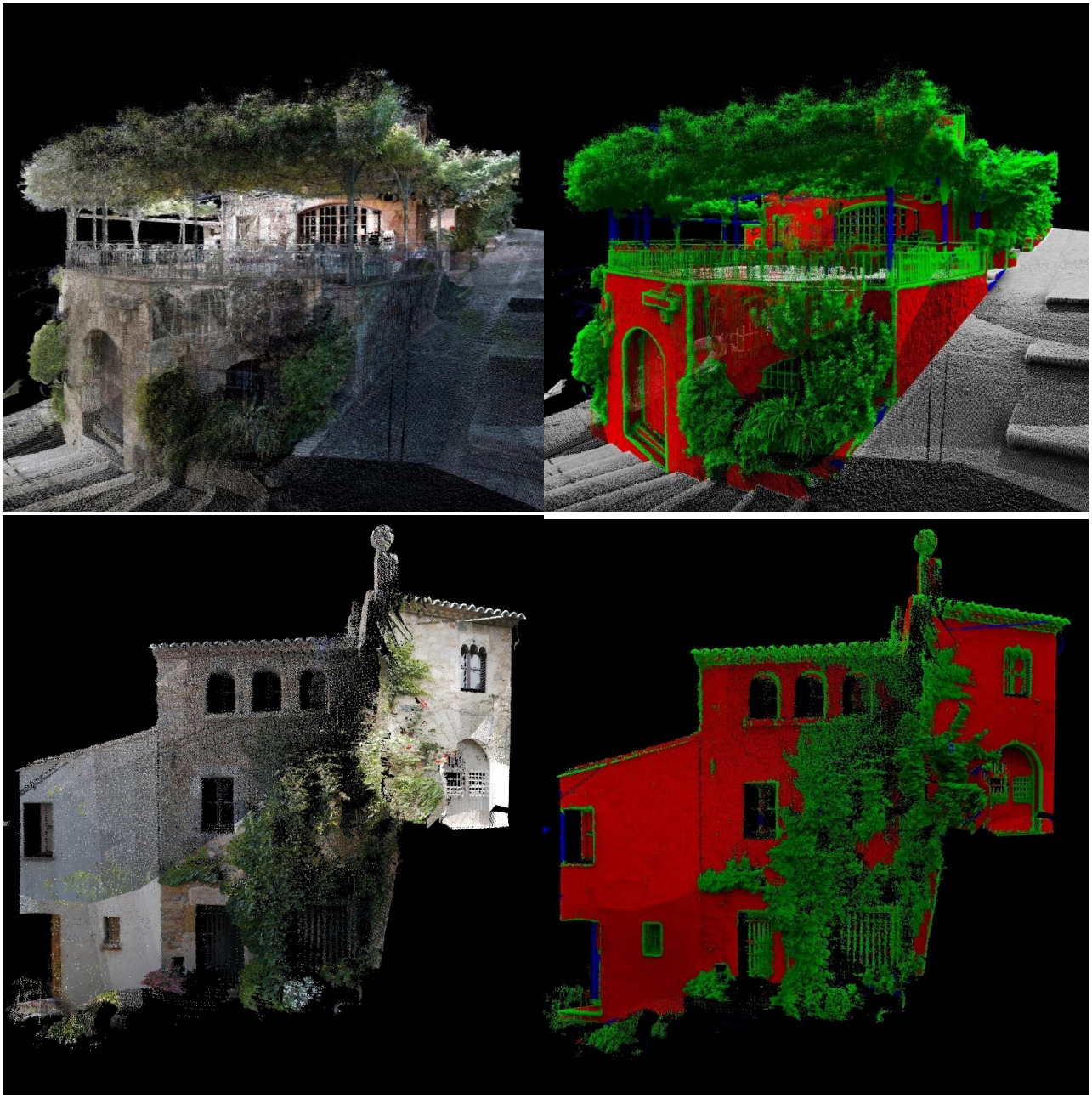


Fuente: Propia

Esta clasificación preliminar permite clasificaciones específicas posteriores, a definir según el caso de estudio, por ejemplo:

- Los pasamanos tienden a ser menos lineales que los cables a una escala de análisis mayor al metro
- A escalas menores a los 5cm los planos de fachada pueden presentar diferentes texturas, lo cual depende de la resolución del TLS utilizado, la distancia de escaneo y el ángulo de incidencia
- La vegetación puede ser segmentada en función al tipo de hoja, a determinada escala tienden a ser planas y otras por su tamaño pueden tener una distribución de puntos más dispersas
- Los detalles o elementos de fachada se pueden clasificar por la distribución de los puntos específicos, por ejemplo los marcos de ventanas tienden a comportarse como objetos lineales y las rejas como planos a escalas mayores a los 10cm.

Ilustración 73: Comparación nube de puntos RGB y nube de puntos clasificada



Fuente: Propia

El objetivo de partida es la clasificación de elementos genéricos, planteando la posible sub segmentación en relación a usos concretos. Los elementos genéricos predefinidos se basan en tres premisas:

- Elementos urbanos: Los tubos, pasamanos, cables y ramas tienden a ser más lineales que volumétricos
- Fachadas y muralla: Las fachadas tienden a ser superficies planas
- Vegetación y carpintería: La vegetación y los detalles de fachada tienden a tener una distribución volumétrica

3.5.4 Ejemplos de estructurar a escala Urbana

A partir de los procesos de segmentación y clasificación desarrollados, se procede a reagrupar o reclasificar las bases de datos, generando interpretaciones concretas de la información, al mismo tiempo esta síntesis se enfoca a características concretas que explican aspectos concretos de los centros urbanos estudiados, lo cual permite nuevos enfoques de conocimiento y describen características específicas a ser tenidas en cuenta.

Antes de comenzar este proceso de reorganización de la información se tiene que plantear que información se quiere destacar, por ejemplo enfocar la representación en base a la información TLS para futuros estudios, a características históricas, características funcionales concretas, etc. Para ello existen tantas combinaciones como aspectos a analizar.

Paralelo a esta definición de objetivos se debe plantear el alcance del proceso, en relación al aporte que se pretende satisfacer, concretando de antemano una interpretación de los datos resultantes y las limitantes, que requerirán estudios posteriores, para cumplir la demanda del proyecto estudiado.

Una vez definida la intención, los objetivos y el alcance, se procede a escoger el método mediante el cual se segmenta la información, en el caso de Villa Vela, mediante la clasificación de formas naturales, formas geométricas planos y su posterior reagrupación manual, en función de una interpretación objetivada, permitiendo el desdoblamiento de la información y el posterior procesamiento de imágenes, desarrollados en los capítulos siguientes.

Es importante en esta definición concretar los tiempos de los procesos y las escalas de trabajo, ya que por ejemplo los procesos CANUPO pueden requerir días de procesamiento a resoluciones muy altas, siendo necesarios procesos de *Core Points*, que permiten realizar el análisis con densidades de puntos menores y su posterior proyección sobre las nubes de puntos de mayor resolución.

A continuación se ejemplifican algunas intensiones de clasificación urbana, con el caso de estudio de Villa Vela, en Tossa de Mar, demostrando que la reagrupación de los datos en diferentes configuraciones permite diferentes enfoques, sobre una misma base de datos, y con ello crear diferentes formas de interpretar zonas urbanas complejas.

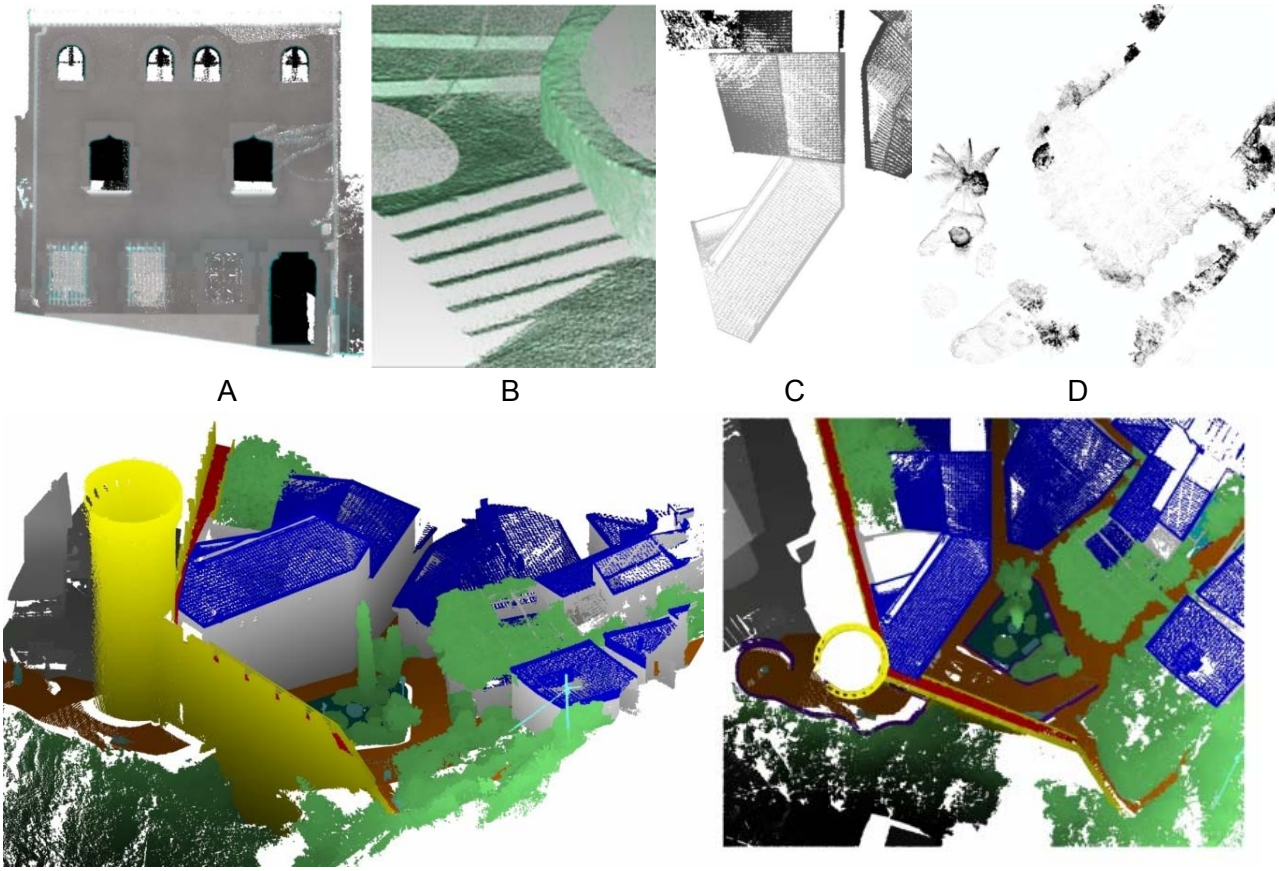
A. Clasificación por características técnicas de la información TLS

Este caso de estudio se amplía en el capítulo 4, relacionando la comprensión de la información TLS con la formad de trabajar para los arquitectos, en términos de plantas y fachadas. Con este objetivo las nubes de puntos resultantes se llegan a dividen en cuatro tipologías, en relación a la resolución TLS, distribución de la información y complejidad, en la Ilustración 74 se ven estas tipologías en base a la información TLS.

- **SUPERFICIES ESCANEADAS DE FORMA DIRECTA,** la fachada y la muralla: En primer lugar las fachadas con la mayor información, ya que el objetivo de este levantamiento se centraba en la obtención de dichos datos, con una resolución de 1 cm de distancia entre puntos como media, la información de la muralla tiene una menor resolución dada la distancia de la toma de datos, pero con una distribución homogénea de la información 3cm entre puntos como media.

- **SUPERFICIES ESCANEADAS DE FORMA INDIRECTA,** el suelo: En segundo lugar la nube de puntos clasificada del suelo presenta una menor resolución, ya no en cuanto a la media de la distancia entre puntos, ya que la problemática de su resolución se debe a la poca homogeneidad de la misma, ya que se genera como una información indirecta a la toma de datos orientada a las fachadas, con una alta resolución alrededor de cada posición y el degradado de dicha información a la distancia, dejando huecos importantes de información por una parte e información redundante en otras con su respectivo ruido.
- **CAPTURA DE PUNTOS LEJANOS,** las cubiertas: En tercer lugar encontramos la información de cubiertas que fue adquirida a la distancia o desde la ronda de la muralla que se encuentra a mayor altura, dejando caras en sombra por la altura de ciertos volúmenes, con una resolución muy baja entre puntos, llegando a ser la media de distancia entre ellos de 20cm.
- **ELEMENTOS COMPLEJOS,** la vegetación y el mobiliario urbano: Por último encontramos una información que por su dimensión, complejidad y ruido necesita procesos singulares, por un lado la información de vegetación que presenta un ruido importante ya que está en constante movimiento y presenta una complejidad que presenta una auto oclusión, por otro lado encontramos elementos urbanos complejos, con un nivel de detalle que alto, que precisan un grado de interpretación para su descripción. La resolución de estas dos informaciones varía según la cara que se realiza la toma de datos del elemento, por lo cual una media en este caso tampoco sería representativa.

Ilustración 74: Clasificación características técnicas de la información TLS



Fuente: Propia

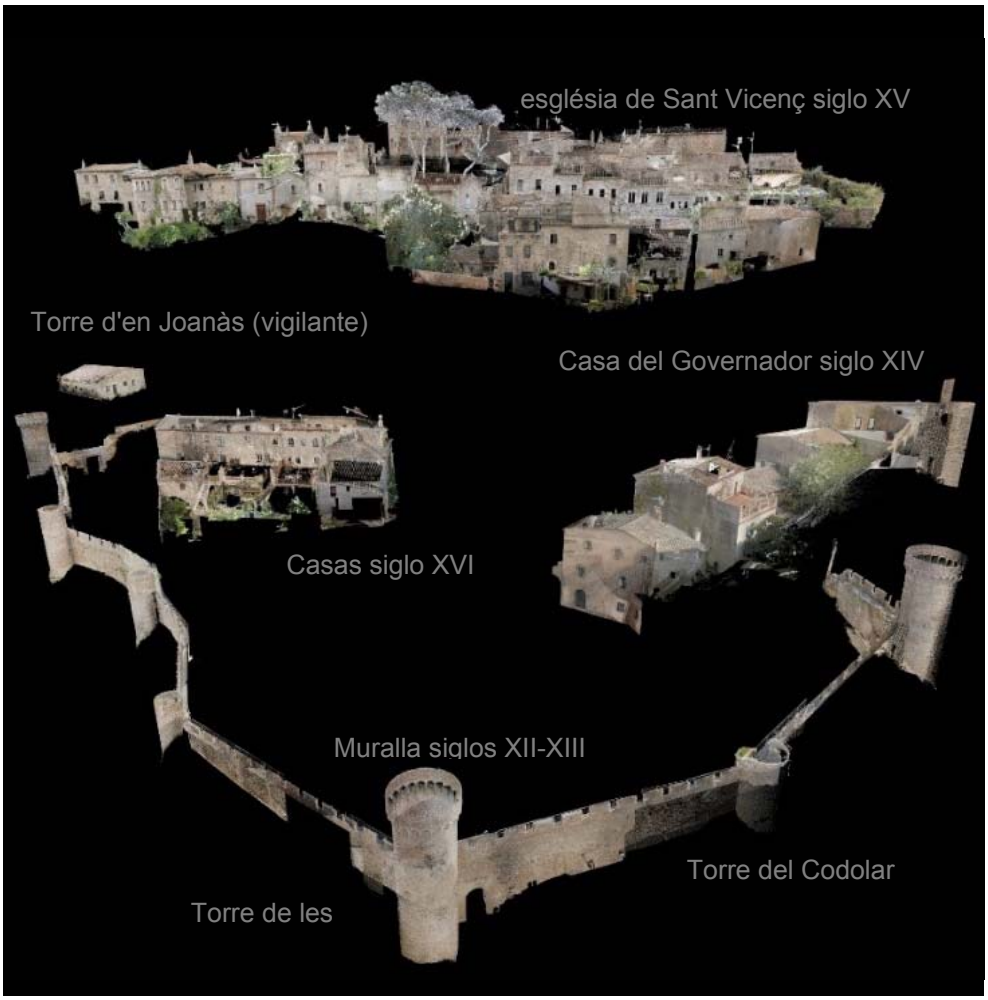
B. Clasificación programa arquitectónico y aspectos históricos

La clasificación de la información del estado actual de un casco historio permite profundizar en el entendimiento de edificios particulares, la relación entre ellos y la relación del casco histórico en la ciudad. El caso de estudio ejemplificado es Villa Vela, ubicada en Tossa de Mar, es declarada monumento histórico-artístico nacional en el año 1931, siendo el único ejemplo de población medieval fortificada que todavía existe en el litoral catalán.

El estado de conservación actual responde a diversas restauraciones, especialmente a finales del s. XIV y durante el s. XVIII, manteniendo el perímetro original con muros almenados, que se distribuye en cuatro torreones y tres torres cilíndricas rematadas por matacanes.

- **Casa del Gobernador:** El museo de Tossa de Mar se encuentra en la antigua casa del Gobernador, como un edificio ligado a la arquitectura e historia de la villa (GIL 2008). Poco antes del estallido de la Guerra Civil Española, en el año 1935, un grupo de intelectuales locales fundaron el Museo Municipal de Tossa, situado intramuros, en concreto en la *Plaça Roig Soler*. Este centro está considerado como el primer museo de arte contemporáneo de España. Aparte de una importante colección de arte, en el museo también se pueden admirar muchos de los objetos encontrados en el yacimiento romano de Villa Romana. El museo se encuentra situado sobre la *Cala Codolar*.
- **Casas siglo XVI:** En su momento de máximo esplendor, la Vila Vella integraba unas ochenta casas. La mayoría de éstas aprovecharon el muro de la muralla como pared de fondo. A partir del s. XVI la población se empezó a expandir fuera de la muralla y se levantaron las primeras edificaciones en el barrio de san Roqueta y a lo largo del camino real.
- **Iglesia de *Sant Vicenç*:** Iglesia de estilo gótico flamígero que data de finales del siglo XIV y fue construida sobre los cimientos recientemente descubiertos de una iglesia románica anterior. El calificativo de "vieja" se debe a que en el siglo XVIII, a causa del aumento de la población de Tossa, se levantó una iglesia "nueva" que recibió el mismo nombre y está situada en la ciudad nueva, la *Esglesia Sant Vicenç*. La iglesia "vieja" fue destruida en el siglo XIX por una explosión después de que los soldados franceses la usaran como polvorín. Dicha iglesia se halla situada junto a la costa, en las inmediaciones del recinto amurallado de Tossa, la Vila Vella Tossa, y en el camino hacia el *Far Tossa*. Dada su privilegiada ubicación, las ruinas son testigos ocasionales de conciertos al aire libre.
- **Torres:** Las torres más conocidas son la *torre d'en Joanàs*, que preside la bahía; la torre de las Horas, situada a la entrada del patio de armas, que debe su nombre a que era el único lugar donde se situó un reloj público; y la torre de es Codolar, también conocida como la torre del Homenaje, que preside la playa de Codolar, Ilustración 75.
  Murallas: Las murallas de la Vila Vella Tossa, que tenían la finalidad de proteger a la población de los ataques de los piratas, fueron construidas entre los siglos XII y XIV y ampliadas posteriormente en el siglo XVI. Las 7 torres de vigilancia albergaban vigías las 24 horas del día, los cuales advertían del peligro a la población para que buscara protección y refugio dentro del recinto. Las torres más conocidas son la *Torre d'en Joanàs*, que se alza sobre la cala, y la Torre de las Horas, junto a la entrada del Patio de Armas.

Ilustración 75: Clasificación histórica, define etapas de desarrollo y edificios singulares de conservación



Fuente: Propia

C. Clasificación funcional, ejemplo análisis de circulación

En la tesis de máster de (VALLS 2010) se desarrolla con profundidad un estudio de accesibilidad, utilizando como caso de estudio el casco histórico de Villa Vela y el levantamiento de Escáner Láser Terrestre descrito anteriormente. En este estudio de profundizan técnicas de interpolación de nubes de puntos, como MDT (Modelos Digitales de Terreno) y mallas TIN (Triangulated irregular network), posterior a ello se desarrolla un análisis de rutas optimas, buscando de forma semiautomática encontrar las limitantes de circulación para personas con movilidad reducida en entornos urbanos patrimoniales, la tesis se centra principalmente en el estudio de las rutas óptimas.

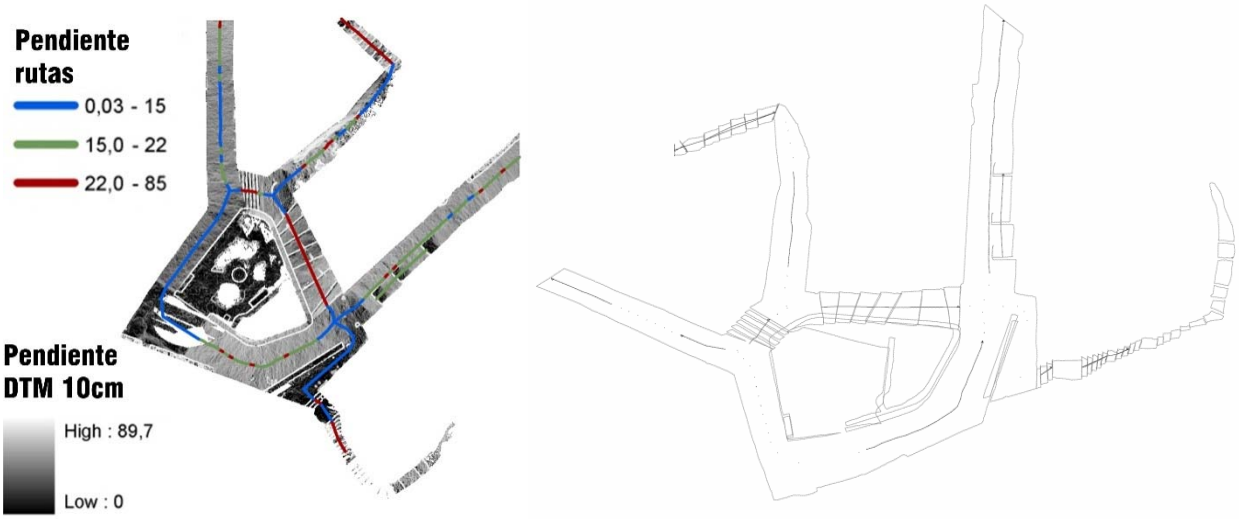
Esta tesis parte de la utilización de la nube de puntos TLS sin clasificar, por lo cual los árboles, cables u otros elementos sobre los trayectos generan errores en las bases de datos de partida, ello demuestra la importancia de la clasificación preliminar al estudio de características específicas. Sin llegar a repetir el estudio de (VALLS 2010), en la Ilustración 76 e Ilustración 67 se propone un proceso de identificación del perímetro de las calles y la identificación de sus centros, mediante el proceso

Thiessen Polygons Voronoi Diagram (DONG 2008). La intersección de estos vectores sobre el MDT de las calles, permite realizar una clasificación de los tramos de calles en relación a la pendiente.

Ilustración 76: Información de partida para realizar un análisis de circulación del casco histórico

Fuente: *Propia*

Ilustración 77: Ejemplo de análisis automático de pendientes, basados en Thiessen polygons Voronoi diagram y su visualización en 3D



Fuente: Propia

Capítulo 4. CONVERSIÓN 3D A 2D Y 2.5D

La captura de información desde el escáner láser parte desde su eje de rotación, esta información se puede visualizar tanto en 3D como en dos dimensiones, es decir la información de la toma de datos 3D se puede visualizar como panoramas, o imágenes 2D con filtros aplicados, como lo puede ser el desdoblamiento del panorama, o filtrado de los datos, por ejemplo en función de la distancia del sensor, esto permite un sin fin de métodos de trabajo, ya que no solo se tiene que pensar en los datos en el espacio, sino también se puede interpretar la información desde el punto de vista de la captura de la información, permitiendo exportar y manipular las bases de datos, en 2D, 2,5D y 3D.

4.1 Antecedentes de conversión de nubes de puntos TLS de 3D a 2.5D

Diferentes autores entre los que destaca (S. BARNEA 2008) trabajan directamente con la información en 2D y 2.5D desde los panoramas por posiciones TLS, principalmente para procesos de clasificación, entre los que se incluyen dichas clasificaciones en procesos de unión entre posiciones, a partir de la detección de relaciones entre los panoramas para su unión, al igual que el uso de detección de contornos, planos o puntos para el mismo fin, este proceso se aplicó en programas propios de las compañías que venden los equipos, como la detección de entidades en el Faro Scene, puntos, líneas, planos, entre posiciones, usando principalmente la información de intensidad.

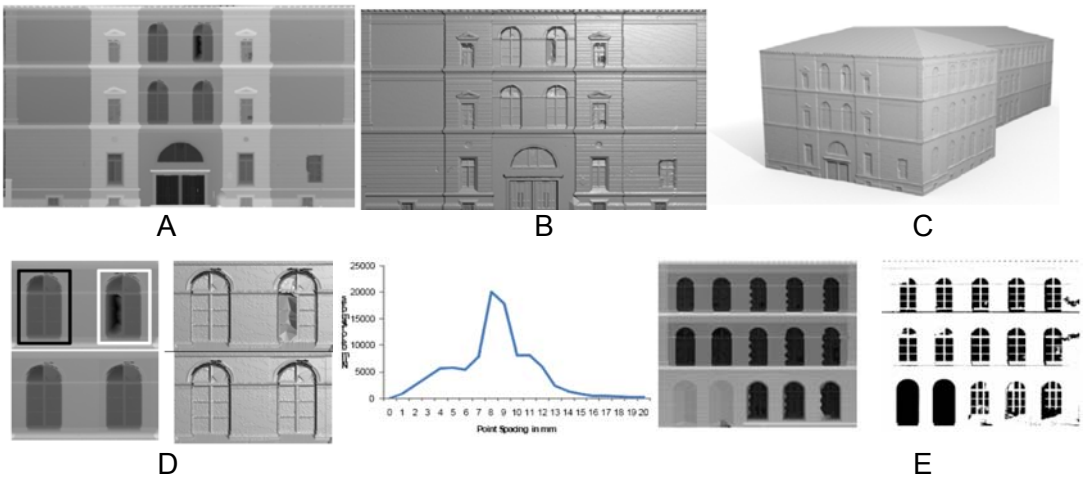
Otros autores utilizan la información TLS con técnicas propias de escáneres aéreos, ejemplo de ello son los levantamientos procesados en Sistemas de Información Geográfica (SIG), que filtra la información de las nubes en X, Y, dejando un único valor para la altura, tanto con mallas, rásters o información vectorial. Un ejemplo de ello es el proyecto de la pirámide de Giza (NEUBAUER 2006), realizado con un escáner láser Rigel Z420i, el cual se filtró en celdas regulares de 0.5 x 0.5 m exportando esta información desde el programa Riscan Pro,7 en un archivo ASCII a Arc GISTM, posteriormente mallado en un formato TIN interno (organización de red irregular de triángulos TIN), almacenando en cada vértice las coordenadas X, Y, la altura (“Z”) identificando los vértices conectados por líneas rectas a él, recogiendo la topología de la referencia a los vértices conectados a cada punto de la red.

Estos procesos no se han aplicado únicamente desde el punto de vista del contexto, o de la planta de los levantamientos, también se han desarrollado en la generación de modelos de alta resolución, imitando los procesos de renderizado, propias del campo del modelado de videojuegos y del campo de gráficos por computador, en los cuales separan la volumetría primitiva, del modelo de alta resolución, por medio de mapas de desplazamiento, pero utilizando las herramientas SIG para ello, en lugar de las utilizadas de forma habitual en el campo de la animación y videojuegos (Ilustración 78).

Estos mapas se consideran mapas de desplazamiento, que almacenan la información de profundidad respecto a un plano como un valor de color en una imagen ráster, que en lugar de color, contiene como dato una longitud de desplazamiento, en dirección de la normal. Un caso de estudio que cabe destacar de estos procesos es de (ADAMI 2011). El cual combinando una geometría básica con mapas de desplazamiento a modo de “ground-based LiDAR” (J. BÖHM 2007), convierte la información 3D en imágenes 2.5D por medio de SIG, aplicando en su proceso filtros (J. BÖHM 2005), que buscan completar la información no registrada en la captura de datos inicial, teniendo en cuenta

para ello las oclusiones y la densidad de puntos, logrando completar según casos de estudios específicos zonas con vacíos de información, mediante la comparación de zonas homologas en base a un sistema automatizado (Ilustración 78 D y E).

Ilustración 78: Mapas de desplazamiento como método de simplificación 3D y evaluación de los mapas de desplazamiento



Fuente: *(J. BÖHM 2007)*

Este proyecto tiene sus limitantes, ya que sólo permite generar fachadas simples que no tengan complejidad volumétrica, sobretodo curvas, ya que el mapa de desplazamiento esta orientaron en una única dirección, al ser desarrolladas en programas SIG, lo cual puede solventarse mediante otras técnicas que tengan en cuenta el desdoblamiento de los mapas de UV, para la generación de los mapas de desplazamiento en geometrías complejas (CORSO 2009).

4.2 Problemática de la medida y representación de los elementos patrimoniales

Entendemos que el principal problema a la hora de trabajar con información TLS por parte de las diferentes disciplinas es la complejidad actual de los formatos TLS, lo cual es un problema temporal, ya que los programas comerciales, como los de Autodesk con el formato Recap, que se van adaptando para facilitar la manipulación de los datos.

Aun así esta barrera impide de partida entender el potencial de esta tecnología, sobre la cual pesa mucho la parte visual, lo cual limita su aprovechamiento, al quedarse el levantamiento en su primera estadio, pero que tiene un gran potencial en el registro y explotación de la geometría de los elementos escaneados, lo cual permite acercarse de una nueva manera a los edificios, no solo en visiones estéticas, como fachadas, secciones, isométricas o prospectivas, sino manipular el bien patrimonial como un todo, que está delimitado por la forma con la cual se manipula los datos.

Para que esta tecnología pueda ser explotada correctamente es necesario no solo comprender la tecnología, sino que se requiere un profundo conocimiento de la realidad que se estudia, con ello también del patrimonio histórico de la obra arquitectónico, especialmente cuando se va a intervenir.

4.2.1 La medida TLS y la documentación de la forma

Con la tecnología TLS partimos de medidas, concretamente como una sucesión de datos numéricos que aportan coordenadas, distancias o ángulos, aunque la lectura de esta información es numérica, se puede visualizar, siempre condicionada a alguna información paralela a la medida, como la dirección de la medida, o información complementaria, siempre como una forma de representación, para pasar de una información cuantitativa en información cualitativa, comprensible y fácilmente manipulable.

Aparte de llegar a este entendimiento, este capítulo busca desarrollar la siguiente duda: ¿cómo debemos representar la nube de puntos, partiendo de su origen como medida y teniendo en cuenta su aporte en relación a otras tecnologías?

Una respuesta concisa de dicha pregunta es: la principal diferencia con otras tecnologías de levantamientos es la precisión métrica, permitiendo una geometría muy detallada del levantamiento, por lo cual la representación de TLS debe contemplar las características geométricas.

En el patrimonio hay un interés creciente en documentar la geometría detallada de los bienes patrimoniales, destacando:

- **Reproducción o reconstrucción.** El conocimiento de la forma a partir de un levantamiento en una situación determinada permite su reproducción o reconstrucción.
- **Respaldo en intervenciones.** La documentación previa a intervenciones es imprescindible ya que la mayoría son lesivas, el bien puede verse afectado de manera irrecuperable.
- **Bienes que desaparecen.** Cuando el elemento patrimonial va a ser eliminado a favor de otro. En el campo de la arqueología es común trabajar con patrimonio que desaparece, lo que queda es el fruto del estudio del bien. Recomendamos leer la entrevista realizada a Reinal González.
- **Investigación.** El poder analizar el bien desde puntos de vista únicos, relacionando el interior con el exterior o el contexto, permite nuevas formas de entender los edificios y sus relaciones desde diferentes disciplinas, al igual que la explotación del detalle geométrico como planos, en el proceso de investigación y difundir conocimientos.
- **Restaurar, preservar y valorar.** La información métrica permite una gestión rigurosa del bien patrimonial, destacando el control de los cambios del bien, las mediciones y el control de la restauración, incluyendo la documentación necesaria para poder evaluar los proyectos en todas sus fases.
- **Difusión.** Favorece la difusión y divulgación, lo cual redunda en un aumento de interés y participación de la población en su preservación.

El patrimonio se documenta con múltiples técnicas, se pueden aplicar tratamientos a los registros obtenidos tanto en el caso de patrimonio tangible como en el intangible, que permitan el recuento por ejemplo de palabras, gráficos, sonidos, etc. Desde este punto de vista la medición no se realiza sobre el elemento patrimonial, sino sobre el registro, y no todos los registros se pueden considerar medidas, por ello se entiende el registro como cualquier almacenamiento de características del elemento patrimonial y **la medida corresponde a la cuantificación de alguna de las características geométricas del elemento patrimonial.** Estas características se pueden identificar en tres ámbitos según (VALLE 2006):

- *"Disposición espacial, posibilita la ubicación del elemento patrimonial de una forma global, respecto a un sistema de referencia planetario, al mismo tiempo que indica la orientación, dato este fundamental para el análisis arqueológico de determinados objetos, como ejemplo se pueden citar los círculos de piedras megalíticos, las pirámides de Egipto, o las cabeceras de determinadas iglesias".*
- *"La forma supone la superficie de contacto entre el propio elemento patrimonial y lo que no lo es, lo que permitirá conocer y delimitar el objeto, su entorno y las relaciones existentes entre ambos".*
- *"Las dimensiones cuantifican la forma y aportan conocimiento sobre su tamaño".*

4.2.2 La representación del levantamiento arquitectónico

> *"Un levantamiento adecuado permite acceder a una proyección depurada y a una cuidadosa programación de costes y de la ejecución de las obras"* (A. JIMÉNEZ 2003)

Hoy en día la representación del patrimonio va desde el croquis, pasando por la planta, alzado, sección, axonometrías y modelos tridimensionales, llegando hasta los sistemas de realidad virtual inversivos. Aunque son diversos los enfoques que se pueden tener para un levantamiento, especialmente entre disciplinas, se deben mantener criterios comunes a la hora de planear una estrategia de levantamiento, para que dicho levantamiento sea útil para trabajos futuros (A. ALMAGRO 2004). El levantamiento arquitectónico es *"multidisciplinar y conlleva, en casi todos los casos, el concurso integrado de varias competencias profesionales, aunque con tareas diferenciadas"* (A. JIMÉNEZ 2003).

Entendiendo que el levantamiento arquitectónico es un proceso en el que intervienen diferentes disciplinas, surgen diversas preguntas de que protocolos o metodologías seguir para que estos levantamientos sean multidisciplinares, entre estas preguntas podemos encontrar: ¿Cómo se debe estructurar la información?, ¿Cómo manejar la falta de datos?, ¿Cómo se debe representar la información? ¿Cómo controlar el error TLS?

Todas estas preguntas no tienen una única respuesta, ya que varían según el caso de estudio, el enfoque, los recursos que se dispongan y las disciplinas que intervengan, aun así se deben establecer criterios de partida que unifiquen estas visiones, a modo de objetivos, que orienten la toma de decisiones y criterios de los levantamiento.

Criterios comunes a tener en cuenta en levantamientos arquitectónicos:

- **Estructura metodológica:** tener en cuenta la gestión del proyecto, en cuanto a planificación, control de la precisión en relación a los objetivos propuestos y la posibilidad de evaluar los resultados obtenidos. Las metodologías, técnicas o instrumental utilizado deben ser congruentes a la finalidad de la investigación.
- **Investigación preliminar:** hay que tener en cuenta trabajos paralelos a la documentación geométrica y técnica, como lo puede ser la documentación bibliográfica, fotográfica, archivística, iconográfica, etc.

- **Alcance del proyecto:** es necesario concretar el alcance general del proyecto, por una parte para no generar expectativas diferentes a las que se pueden materializar, en relación a los medios y el tiempo.
- **Definición y control de calidad:** es necesario garantizar que las medidas tengan una precisión acorde a las características del levantamiento, teniendo en cuenta el error del grafismo y las posibilidades que ofrecen los instrumentos utilizados. Por otra parte respecto al control de calidad, teniendo en cuenta un sistema de medidas único, la escala de trabajo, la escala a la que se sintetizará el proyecto, la georreferenciación o referencia local con la que se relacionan los diversos levantamientos realizados o por realizar.

Criterios de representación del levantamiento:

- Al no existir un estándar grafico unificado para levantamientos a nivel internacional, hay que seguir las normas adoptadas en centros nacionales e internacionales, como los que se comentan en el capítulo 2.4 Metodologías TLS relacionadas con el patrimonio.
- El levantamiento se debe sintetizar en temáticos significativos, en relación a su valor y a su conservación, diferenciando los elementos que componen los edificios, como lo son los elementos decorativos, mobiliarios permanentes, elementos del contexto en relación a la escala, etc.
- Los levantamientos temáticos precisan tanto de una memoria técnica, como de los metadatos que describan los procesos aplicados, diferenciando los criterios de su realización, el grado de precisión y los tipos de dibujo. Los levantamientos temáticos están en relación directa a las diferentes disciplinas del patrimonio, pueden ser por ejemplo de estructuras, de revestimientos, etc.
- El levantamiento se debe trasformar en un sistema de información capaz de asumir los diversos datos que con el tiempo se puedan añadir, entendiendo que un levantamiento se puede usar para diversos fines, con escalas y objetivos diferentes.
- El levantamiento debe registrar de forma suficiente el bien arquitectónico, para lograr representarlo en todas sus partes.
- La síntesis del levantamiento debe contemplar una tolerancia métrica predefinida, en relación a una escala de representación y contenidos previstos, siendo esta representación homogénea en las partes que componen el levantamiento.
- Tener en cuenta la representación a escalas variables, según la aproximación al objeto arquitectónico, sus dimensiones y el nivel de detalle de zonas representativas. Es conveniente mantener la relación en términos de coordenadas de representaciones graficas del mismo bien patrimonial, aunque este dibujadas a escalas diferentes. Que la representación este a escala, que incorpore escalas graficas o un sistema de acotado, que permita la interpretación de estos

También debemos tener en cuenta que el levantamiento debe estar orientado según criterios técnicos de los levantamientos que van a ser explotados de forma científica y las demandas sociales que le dan valor al bien patrimonial y que se deben plasmar en el conocimiento del bien patrimonial. Lo cual se refleja en la síntesis del levantamiento, en relación a los criterios y objetivos finales a los cuales se orientan.

Levantamiento técnico - científico: Es un levantamiento que está en relación a las necesidades de las disciplinas que intervienen el patrimonio (ingenieros, arquitectos, arqueólogos, restauradores,

historiadores, abogados, publicistas, pedagogos, políticos, etc.). Con visiones, metodologías de trabajo y necesidades de documentación diferenciadas.

En la es necesaria una edición temática de la planimetría a partir del mismo levantamiento y de la observación directa, en algunos casos utilizando material impreso en estudio de campo, su posterior análisis y digitalización.

Como estas representaciones no están reguladas, se puede encontrar infinidad de interpretaciones de un mismo objeto, desde las diferentes disciplinas, en algunos casos con pocos puntos en común, por ello de la necesidad de investigar metodologías y técnicas que permitan unificar criterios.

Una de estas interpretaciones es utilizar el levantamiento como herramienta para una lectura histórica del edificio. El levantamiento puede estar asociado a observaciones históricas, desde una aproximación documentada, como de observaciones inéditas, a partir del estudio del edificio.

Todo ello parte del conocimiento preciso, fiable y depurado del bien patrimonial en su estado actual. El levantamiento debe tener bases técnicas, tecnológicas y de materiales del objeto, que permitan un mayor conocimiento de sus características constructivas, los factores que afectan su conservación y que faciliten mantenimiento, tanto económicamente como en minimizar el impacto de las intervenciones.

Levantamiento para difusión: Las necesidades de difusión patrimonial, parten desde el mismo valor del patrimonio, vivimos una época en la que cada vez estamos más conectados facilitando el acceso a la información de forma digital, ello lleva a que demandamos un conocimiento inmediato de los elementos que damos valor y consideramos patrimoniales.

Sumado a ello en actualidad la sociedad espera un rápido retorno de las inversiones realizadas, lo cual se debe tener en cuenta, en los objetivos de los proyectos. Por otra parte este afán de conocimiento y de dar el correcto valor al patrimonio, genera nuevos lenguajes, que se pretenden sean inteligibles y universales, con los cuales acercarse al conocimiento de elementos materiales o inmateriales que la sociedad considera patrimoniales.

Por ello la documentación y representación del patrimonio permite aproximar a un mayor público al conocimiento del patrimonio, principalmente desde los análisis figurativos, interpretaciones históricas, críticas, objetivas, a las características de lo que le da valor al bien, bien sea los materiales, las técnicas constructivas, o acontecimientos que enmarcan tanto al patrimonio como a su contexto.

4.2.3 Temáticos y representación gráfica en levantamientos

“Es esencial que el levantamiento temático se extienda, con la participación donde convenga de los especialistas sectoriales, a la totalidad del organismo” (A. ALMAGRO 2004).

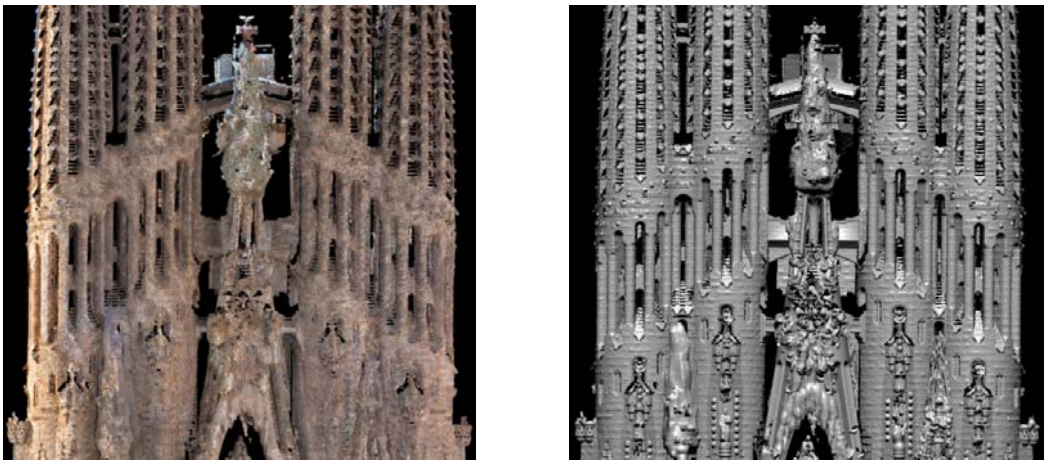
Partimos del principio de que la arquitectura requiere de un análisis, selección y síntesis para su adecuada representación en función a objetivos predefinidos, estos procesos no se puede realizar sin una etapa de abstracción con criterios, que permita pasar de la realidad de la obra a su representación, siendo una actividad intelectual, que una maquina no puede realizar por si sola.

Por ello la calidad del resultado final depende de la habilidad, la práctica y la capacidad de interpretación del operador que maneje el sistema de restitución.

Representación en 3D, 2D y 2.5D.

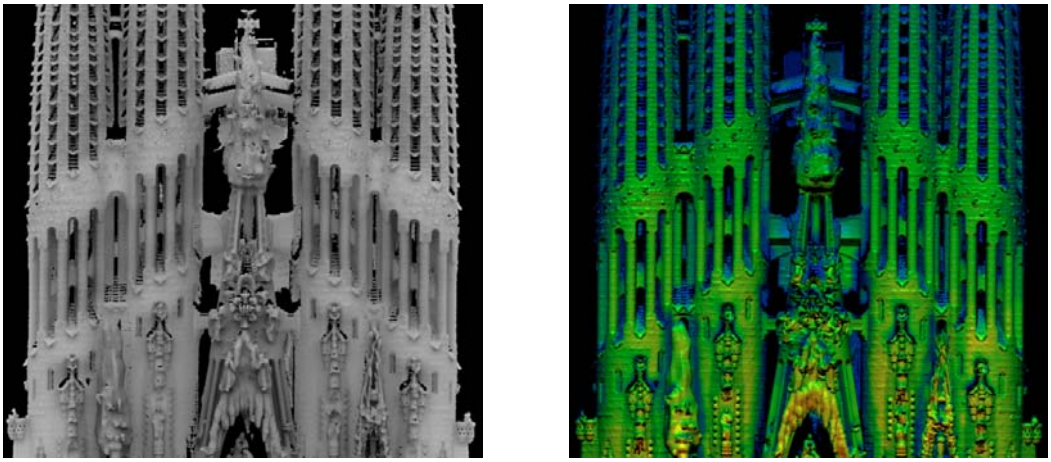
Los criterios de representación o protocolos de representación, son un esfuerzo por ordenar y estructurar las tareas gráficas, como levantamientos básicos. Es importante que los levantamientos no se limiten a proyecciones tradicionales de plantas, secciones, y alzados, sino que documente de forma completa las partes visibles y de forma general, integrando por ejemplo en representaciones axonométricas la información de planos en vistas de conjunto, logrando un mayor entendimiento del bien patrimonial. Para la representación TLS se requiere o añadir información a los datos numéricos o procesar estos datos, para que tengan una lectura concreta, como se muestra en la Ilustración 79 e Ilustración 80.

Ilustración 79: Añadir información a las medidas TLS. RGB y Normales



Fuente: Propia

Ilustración 80: Procesar la información de medidas para su análisis y representación



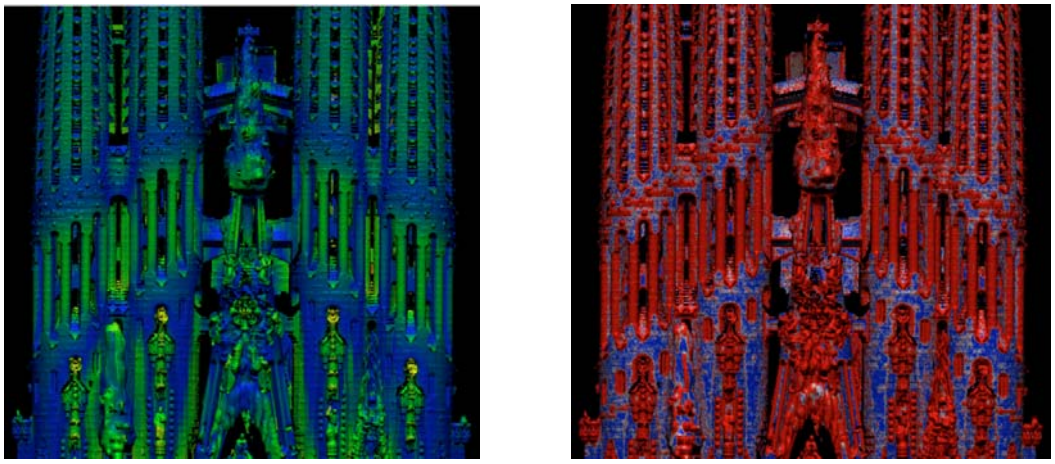
A) Iluminación por oclusión ambiental B) Densidad de puntos en rangos de 30cm

Fuente: Propia

Las medidas TLS únicamente suministran información geométrica cuantitativa de la superficie estudiada, usualmente se convierte en un archivo de coordenadas de nubes de puntos. Para que tengan la capacidad de representar y servir como registro de un bien patrimonial, habrá que asignarle a cada punto características de tipo cualitativo, como el color, la pertinencia a una recta, la elevación, el tipo de línea, etc.

Otro ejemplo es la clasificación *CANUPO* de la Ilustración 81, se basa en una clasificación entre un plano (azul) y medio cilindro (rojo), lo gris es lo que no corresponde a ninguna de estas categorías en un 90% de confianza. Escalas entre 10cm y 50cm cada 10cm.

Ilustración 81: Representación usando falso color



C) Rugosidad de la superficie, Kernel de 1.3 D) Clasificación superficies naturales CANUPO

Fuente: Propia

4.2.4 Métodos de representación

> "El dibujo como medio de expresión y representación se ve forzado a transformar en formas bidimensionales el espacio arquitectónico y los volúmenes y elementos que lo configuran."
> (A. ALMAGRO 2004)

Desde la representación arquitectónica se considera que el sistema que permite conocer de forma directa las dimensiones del objeto es el sistema diédrico, siendo un sistema que rara vez se asemeja a la visión humana. Por ello se suele utilizar la perspectiva o proyección cónica, que se asemeja a nuestra visión, pero sobre la cual se dificulta tomar medidas de forma directa, por ello el sistema diédrico *"relega como medio de representación válido para aplicaciones constructivas o de análisis que conlleven valoraciones dimensionales"* (GÁMIZ 2003).

Con la introducción de técnicas por computación, los modelos digitales resuelven el paso entre sistemas de proyección, "*al permitir generar auténticos modelos tridimensionales con los que resulta posible conocer tanto los valores dimensionales de lo representado, como obtener cualquier tipo de representación bien sea en proyección ortogonal (diédrica), ortogonal oblicua (axonométricas) o centrada (perspectiva cónica)"* (GÁMIZ 2003).

Representación patrimonial, el estado actual de edificios existentes.

La complejidad de la representación en el proceso de diseño arquitectónico depende de la propia naturaleza con la que se concibe el proyecto a representar, por lo general la representación en los procesos de diseño parten de los espacios y volúmenes reducidos a formas prismáticas, en algunos casos de fácil definición geométrica, *"además, hay que tener en cuenta que en estos casos se trabaja sobre un modelo ideal en el que la geometría suele imperar sobre cualquier otra causa o razón para la elección de las formas"* (A. ALMAGRO 2004).

A diferencia de ello la representación del patrimonio requiere la intervención de diferentes disciplinas, con diferentes enfoques, actuando en edificios complejos, a los que cabe incluir el paso de los años y sus intervenciones, por lo cual su representación depende directamente del estado actual del edificio en periodos determinados, siendo para ello fundamental conseguir un nivel de detalle tal que permita conseguir los objetivos propuestos para tal representación, en el que cobra un peso fundamental el rigor métrico, la precisión y fiabilidad requerida.

Las necesidades de representación del patrimonio, parten del objetivo común de los levantamientos arquitectónicos, el conocimiento del bien patrimonial. Este conocimiento comienza con el estudio del estado actual, de la forma real del edificio, sobre la cual posteriormente se pueden realizar trabajos de representación teórica, o la interpretación de su evolución histórica, esta documentación histórica hace que la representación de estos edificios sea aún más compleja.

El estado actual de las edificaciones patrimoniales puede ser diferente al proyecto inicial, distanciándolo de una geometría pura. Estas diferencias pueden haber sido causada por ejemplo por deformaciones a causa de problemas estructurales, deterioro, efectos del tiempo, alteraciones posteriores, accidentes que afecten el edificio o simplemente una mala ejecución del proyecto, entre otras causas. Según (CRAMER 1986) y (A. ALMAGRO 2004) se requieren los siguientes criterios en la representación de levantamientos patrimoniales:

- Análisis preliminar para definir jerarquías, estructura y codificación de los archivos.
- *"Escala elegida para la representación final del dibujo. Una escala grande requerirá generalmente más contenidos de detalle y obligará por tanto a una forma de representación más "realista", menos codificada y más cercana a la realidad. Una escala de dibujo menor comportará necesariamente el simplificar la representación, sintetizando los contenidos y acudiendo a códigos que nos faciliten esta labor. Un dibujo a pequeña escala será siempre más abstracto y requerirá de un mayor esfuerzo de interpretación".* (A. ALMAGRO 2004)
- Documentaciones paralelas como vídeos, fotos son un complemento indispensable, pero no remplazan los levantamientos que permitan mediciones directas.
- La planimetría como base permite recoger otros tipos de información, que se recoja de forma preliminar, o en el trascurso de obras, lo cual debe ser registrada por todos los medios disponibles, especialmente si la propia intervención va a suponer una alteración, ocultación o incluso desaparición de tales datos.

4.2.5 Escalas y precisiones en relación a los objetivos propuestos

Con la aparición del CAD pasamos de hablar en términos de escalas a hablar de precisiones, ya que se puede imprimir a cualquier escala al ser digital, aun así se exige que el trazado grafico sobre papel sea acorde al levantamiento y con la escala de representación predefinida en el modelo vectorial, es decir la información digital se debe imprimir a escala, la cual debe estar de acorde a su visualización final.

Lo inverso sucede cuando la información de partida es ráster, al tener una resolución de partida fija se puede hablar en términos de escala, teniendo en cuenta que la escala estará en función a la precisión que tenga la información de partida. Si la información de partida es la Fotogrametría puede conducirnos a errores relativos[55] altos, ya que la resolución de la Fotogrametría puede no permitirnos apreciar detalles a ciertas escalas, detalles pequeños, sin embargo la precisión absoluta[56] es menor que otras técnicas, ya que hay un control general de los errores y con ello unas precisiones que pueden ser homogéneas.

Las técnicas de levantamiento deben orientarse según los objetivos propuestos, escogiendo la técnica que se ajuste más a las necesidades. Aun así combinar distintos sistemas permite ayudar a conseguir una mayor homogeneidad y control de la información.

La precisión de los escáneres láser depende de los instrumentos y de las metodologías usadas (revisar punto 2.5 Análisis del error TLS), ello se traslada a las informaciones generadas como imágenes ráster, sumado con la resolución que se puede llegar a obtener partiendo de una resolución fija.

Cuando se habla en términos de resolución TLS, se debe entender que en la mayoría de instrumentos la información se capturan desde un eje de rotación, con ello la resolución cambia en función a la distancia desde el centro del escáner, es decir si se escaneamos por ejemplo un elemento plano vertical, la resolución variara radialmente, desde la posición en la que se toma los datos y el ángulo de incidencia (Ilustración 82).

Es más complejo la definición de la resolución cuando se unen posiciones TLS, ya que varía en función a las distancias entre los elementos y las posiciones TLS, aun así se puede conocer de forma estadística la distancia media entre los puntos de una nube de puntos y con ello la resolución máxima con la que se pueden generar imágenes, a partir de datos TLS.

Para ello debemos tener en cuenta los siguientes puntos en relación a la resolución[57] de imágenes obtenidas con datos TLS**:**

[55]**Precisión relativa:** "nos definiría el error con que ese punto se ha dibujado en relación a otros próximos de su entorno". (A. ALMAGRO 2004)

[56]**Precisión absoluta:** "nos da el error máximo con que representamos un punto respecto a su posición real en el espacio, relacionado por tanto a un sistema de referencia externo al objeto". (A. ALMAGRO 2004)

[57] *"Resolución: El pixel es el elemento más pequeño al que un dispositivo de visualización puede asignarle de forma independiente un atributo como es el color. Así se define la resolución como la dimensión lineal mínima de la unidad más pequeña del espacio geográfico para la que se recogen los datos. Cuanto menor sea el tamaño de dicho pixel y por ende de la zona representada por dicho pixel, mayor es también el número de celdas que se representarán mediante dicho ráster. La resolución dependerá del nivel de detalle con el que se quiera representar el mundo real, teniendo en cuenta las posibilidades de análisis y hardware/software."* Fuente: (REYES 2007)

- Resolución debe ser el doble de la medida mínima necesaria. Ejemplo si se quiere ver una grieta de 2mm la resolución debe ser de 1mm.
- El ojo humano no puede distinguir un nivel de detalle menor a 0,2mm en papel impreso, por lo cual el error del resultado final no puede sobrepasar este límite. 0,2mm * la escala da el error mínimo que se puede tener en milímetros.
- Se recomienda usar un tamaño de pixel mayor que el espaciado de punto promedio. Esta información está en el metadato.
- Tener en cuenta las características técnicas del escáner y la metodología de registro. Por ejemplo con: La afectación factores ambientales, alteración por el color en relación al escáner, ángulo de escaneó, la distancia del TLS - objeto, incidencia angular, calidad en la captura de las mediadas y resolución de captura.
- Control de la precisión en el proceso de unir posiciones TLS.
- Tener en cuenta las propiedades de entrada y de salida. Valores de salida como: Tamaño de la celda, tipo de dato, tipo de clase[58] para información clasificada, tipo de agregación de celda, llenado de vacío, ancho máximo, triangulación, factor z (exagerar o conversión).

Ilustración 82: LAS data set a Ráster, ejemplos de resolución e interpolación de datos. Murales capilla Sant Miquel

A) Resolución 1mm B) Resolución 2mm C) Resolución 1mm interpolando la falta de datos

Fuente: Propia

Los levantamientos pueden tener diferentes grados de detalle, por ejemplo (A. ALMAGRO 2004) plantea tres niveles:

- **Primer nivel de reconocimiento:** Para labores de inventario o de simple constatación de problemas y necesidades de actuación. Puede constar de fotografías, documentos gráficos de fácil elaboración como croquis o esquemas proporcionados sin escala precisa.

[58] *"Zona o Clase: se trata de una agrupación temática de las celdas de un fichero ráster de acuerdo a un criterio clasificador (por ejemplo, usos del suelo). Los software GIS nos permiten entre otras funciones realizar mediciones de variables continuas a partir de dichas zonas o clases (Véase Funciones de Análisis Zonal mediante SpatialAnalyst) tales como valores medios, máximos, mínimos, desviaciones estándares, etc."* Fuente: (REYES 2007)

- **Documentación preliminar:** Para la realización de trabajos de investigación y estudios arquitectónicos así como la redacción de anteproyectos. Debe constar de documentación fotográfica y descriptiva, planos generales del edificio a escala y con errores no mayores de 10 cm, a partir de la escala 1/200. También pueden incluirse detalles de elementos o zonas singulares a escala 1/100 o 1/50 con errores menores de 3-5 cm.
- **Documentación de detalle:** Para la realización de proyectos de intervención, documentación que permita análisis estructurales, de deformaciones o de lesiones y patologías. Puede constar de documentación fotográfica y descriptiva, planos generales a escala mínima de 1/100 con errores menores de 3-5 cm y planos de detalles a escalas 1/50 o 1/20 con errores menores de 1-3 cm.

En conclusión las escalas, los grados de precisión, los tipos y modos de representación, sistemas de proyección a utilizar, etc. están relacionados con los usos, finalidad, objetivos y alcance de los proyectos.

4.3 Desdoblamiento del modelo 3D

El desdoblamiento de un modelo 3D parte de la identificación de sus partes, su selección y recomposición, en función al objetivo y de la escala de trabajo, predefinidas antes de realizar el levantamiento.

En este proceso interviene principalmente el tamaño del elemento y la metodología de escaneo. Por una parte el tamaño del elemento indica el nivel de subdivisión requerido, para la descomposición de sus partes, por ejemplo un objeto arqueológico pequeño se puede desdoblar en su totalidad, poniendo de forma ortogonal todas las caras que lo componen, un edificio se puede desdoblar en función del programa arquitectónico apoyado en plantas, secciones y fachadas, y un análisis urbano se pueden desdoblar las fachadas y ver la proyección en planta de las calles, pero en principio no se subdividirían los elementos interiores de las fachadas. Claro todo ello en relación a los objetivos propuestos.

Plantear un único proceso de subdivisión de la realidad para plasmarlo en imágenes ráster es complejo, dada la variedad de casos y tecnologías usadas, aun así planteamos dos ejemplos de desdoblamiento de la realidad, para análisis concretos, estos ejemplo abarcan los dos casos extremos, por un lado el análisis de un espacio arqueológico, compuesto por murales, que se deben trabajar con una precisión de milímetros, con un escáner de alta resolución el Faro Focus^{3D}, y por otro lado un caso de estudio Urbano, partiendo de una toma de datos que no es homogénea, dada la accesibilidad a los espacios y con un escáner de largo alcance como el Riegl z420i.

Estos casos de estudio permiten una primera aproximación a la problemática tratada, permitiendo replantear estrategias metodológicas en próximos levantamientos, que requieran este nivel de detalle, en relación a la construcción de planos Ráster como bases de datos y modelos 3D que permitan una mayor comprensión de los elementos estudiados.

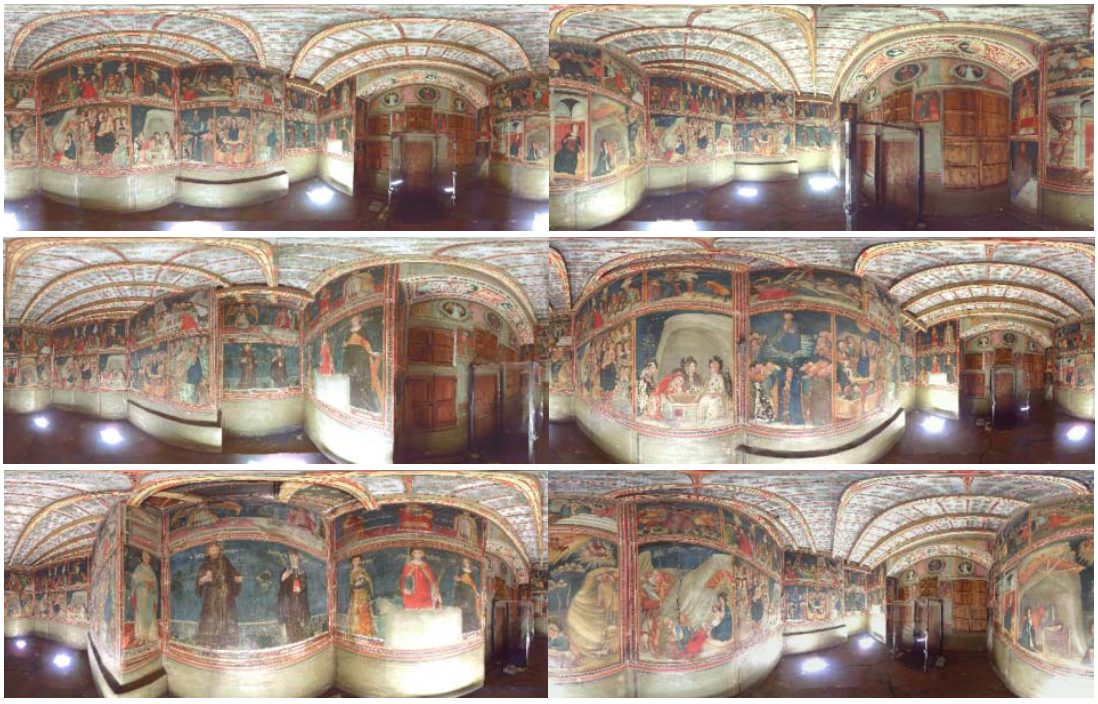
4.3.1 Caso de estudio, desdoblamiento de los murales de la capilla de Sant Miquel

Las pinturas de la capilla de Sant Miguel del Real Monasterio de Pedralbes muestran las novedades técnico – artísticas de las ciudades toscanas hacia el año 1300, las cuales se conservan casi intactas hasta la actualidad, ello ha llevado a que diferentes disciplinas reúnan y contrasten estudios desde diferentes perspectivas, entre ellas se encuentra la historia del arte, estudios de física, de química, geología, de biología, arquitectura y conservación – restauración.

Todo ello para garantizar las condiciones idóneas para su conservación y garantizar la perdurabilidad de los murales. Estos murales de la pintura gótica Catalana se atribuyen al pintor *Ferrer Bassa*, del siglo XIV. Existe una extensa documentación de este punto patrimonial, como por ejemplo: (SENSERRICH y FONT 2007), (ALCOY 2007), (M. d. MUHBA 2012).

Dada la resolución necesaria para el levantamiento y la complejidad del recinto, se realizaron múltiples posiciones de toma de datos. Como punto de partida para homogenizar los panoramas de las posiciones, comenzamos por igualando el tono, la saturación y el color, a escalas homologas entre imágenes, con ello se logra identificar los rangos de colores manejados y el ajuste para que cada imagen contenga el mismo valor de color, ya que todas las escenas contienen los mismos valores, al contemplar casi todas las pinturas en todas las posiciones. En la Ilustración 83 se logra apreciar esta homogeneidad de seis posiciones TLS.

Ilustración 83: Homogenización del color entre panoramas



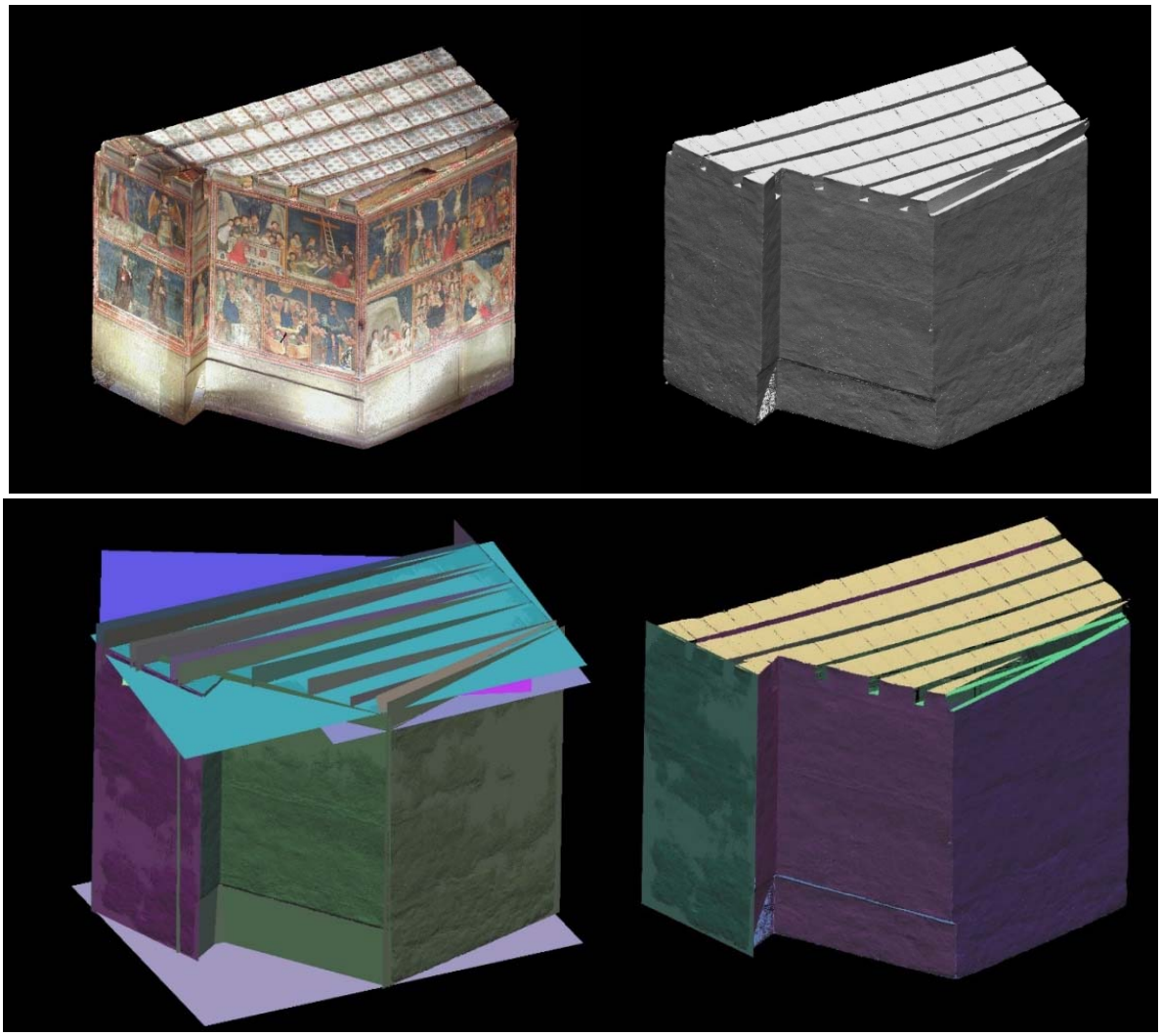
Fuente: Propia

Toma de datos: Al ser un espacio reducido, a que las posiciones TLS se solapaban más de un 90% y por la resolución del Faro Focus con una resolución de 1/5 y una calidad de 4x. El registro se llevó a cabo mediante el proceso iterativo ICP.

Homogenizar la información: El color de las fotografías se unifico al igualar el histograma de los panoramas en relación a un panorama base.
Clasificación de planos y desdoblamiento en 2D y 2.5D

La clasificación se realizó en dos pases: Para encontrar las superficies que conforman el modelo, se procedió a dos escalas de clasificación, para agrupar los planos, una encontrando los planos de mayor tamaño con los muros y la segunda que buscaba desglosar los planos que conforman las vigas de madera Ilustración 84.

Ilustración 84: Calculo de normales. Izquierda modelo simplificado con color a 8815775 puntos, derecha información de las normales



Fuente: Propia

Los rangos de usados en la clasificación son:

Primera clasificación: puntos a un rango entre 0.03-0.06, tomando 50000 puntos para definir el plano, nube filtrada a 8815775 puntos, detectando 14 superficies planas

Segunda clasificación: puntos a un rango entre 0.05-0.1, tomando 5000 puntos para definir el plano, nube filtrada a 8815775 puntos, detectando 40 superficies planas

Matrices de rotación para los planos clasificados

A partir de dicha clasificación se agrupan las nubes de puntos y se identificaron los planos que conforman el elemento estudiado. Dichos planos rectangulares se crean a partir del promedio estadístico de los puntos agrupados, consiguiendo con ello las matrices de desplazamiento, para desdoblar las superficies clasificadas. El desdoblamiento obtenido se puede ver en la Ilustración 85, Tabla 3.

Tabla 3: Cuatro tablas de matrices de rotación y translación, de los planos clasificados de muros, techos, suelo y vigas

	Muro 1	Muro 2	Muro 2 sobre arco	Muro 3	Muro 4	Muro 5	Muro 6	Muro 7	Muro 8
Rotación inicial en Z	180,503	270,399	269,622	0,31	72,546	143,01	235,13	159,09	269,128
Rotación X Y	-90	-90	-90	-90	-90	-90	-90	-90	-90
Traslación X	17,23	20,95	39,27	21,01	23,43	29,44	25,45	31,85	39,24
Traslación Y	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
Traslación Z	3,715	0,01	-0,65	-0,015	3,255	5,12	0,8	5,75	-0,61

	Techo
Rotación inicial en Z	93,907
Rotación X	-90
Rotación Z	180
Traslación X	26
Traslación Y	-0,2
Traslación Z	4,575

	Suelo
Traslación X	1,5
Traslación Y	0,84
Traslación Z	0

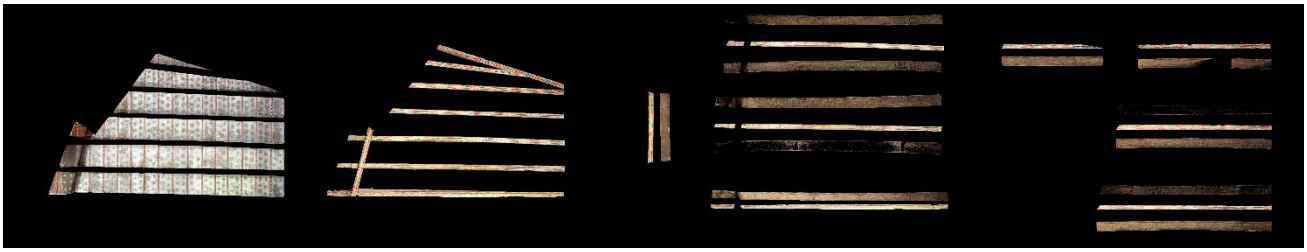
	Viga 0	Viga 1	Viga 2	Viga 3	Viga 3	Viga 4	Viga 5	Viga sola
Traslación X	7	9,3	20,95	9,3	17,4	17,4	17,4	14,2
Traslación Y	1	-0,2	1,1	2,4	-2,2	-0,9	0,7	0,6
Rotación Z	14,2							

Fuente: Propia

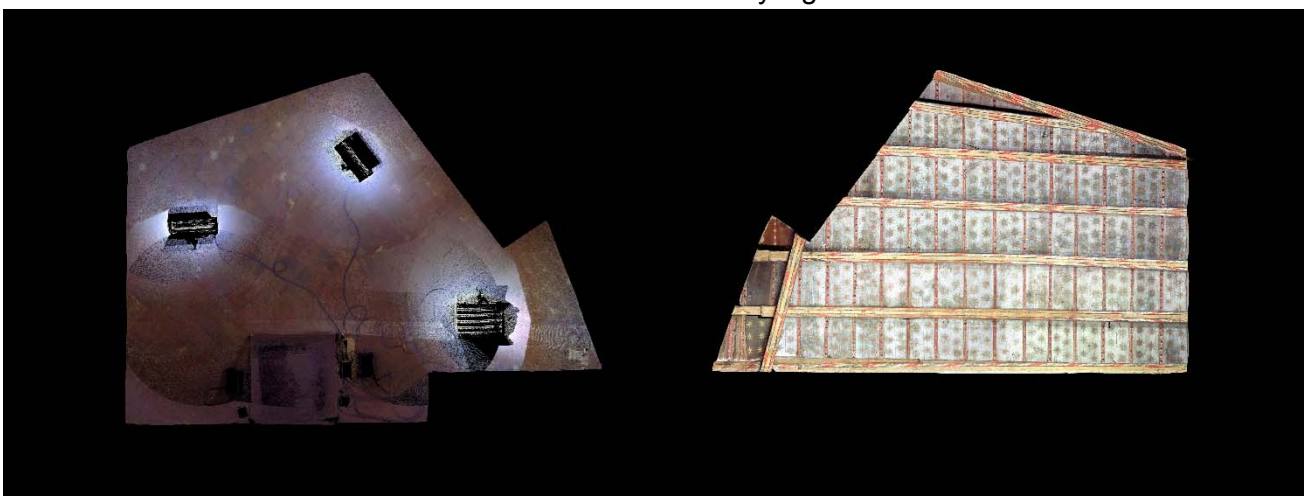
Consideramos los límites de dichos planos las coordenadas que contienen los puntos agrupados, tanto como información del promedio de la superficie “plana”, como en relación al límite de la selección, con estos datos podemos conocer la transformación y rotación que debemos aplicar sobre los grupos de puntos seleccionados en la clasificación, para que estos se puedan orientar de igual forma, con ello lograr desdoblar la geometría del recinto. Igualmente este dato de rotación y translación se puede almacenar, permitiendo repetir este proceso con otras nubes de puntos. La aplicación de las matrices en las bases de datos se representa en la Ilustración 85.

Ilustración 85: Desdoblamiento de los planos en un archivo de nube de puntos. Superior RGB, inferior mapa de profundidades

Desdoblamiento de fachadas



Desdoblamiento techo y vigas



Suelo y techo sin desdoblar (el techo visto desde abajo a arriba, vista interior)

Fuente: Propia

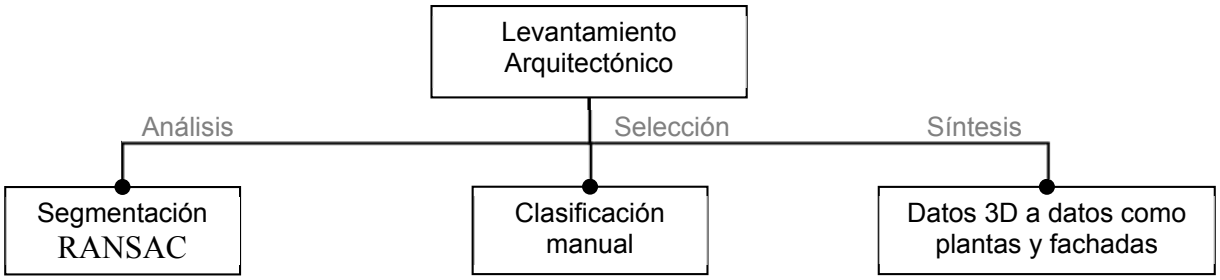
4.3.2 Caso de estudio, desdoblamiento de la escala Urbana

Los levantamientos resultan de especial interés para el conocimiento de la realidad arquitectónica y además sirven para recopilar, organizar y suministrar información objetiva a diversas disciplinas, es "*una rigurosa tarea destinada a la profunda comprensión del objeto arquitectónico y a la formación de la visión crítica y personal*" (SEGUÍ 1996).

Comenzando por el análisis como un proceso de distinción y separación, continuando con un proceso de selección Ilustración 86, que nos permite la clasificación y comparación de dicha información, a

diferentes escalas y niveles de profundidad, concluyendo con la relación de las partes, ya que la arquitectura no es explicable por la suma de sus partes de forma aislada.

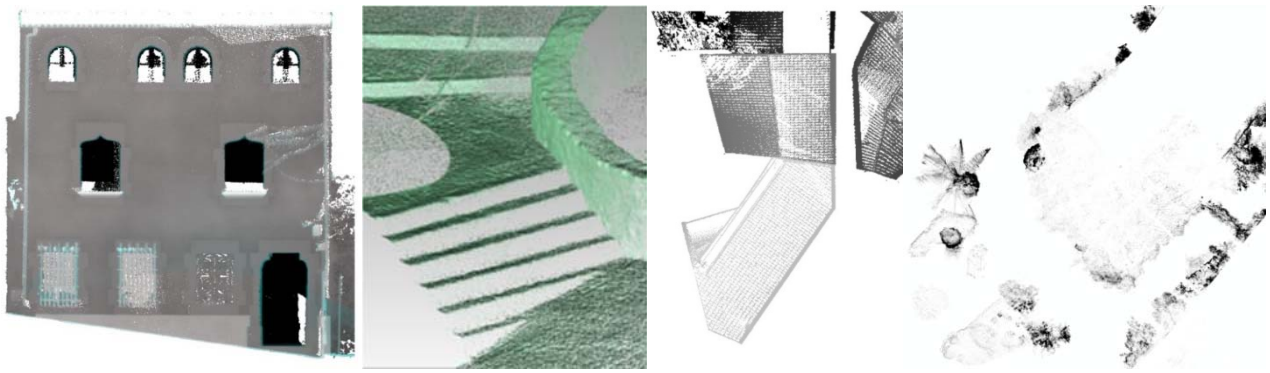
Ilustración 86: Proceso de clasificación utilizado en relación al concepto de levantamiento



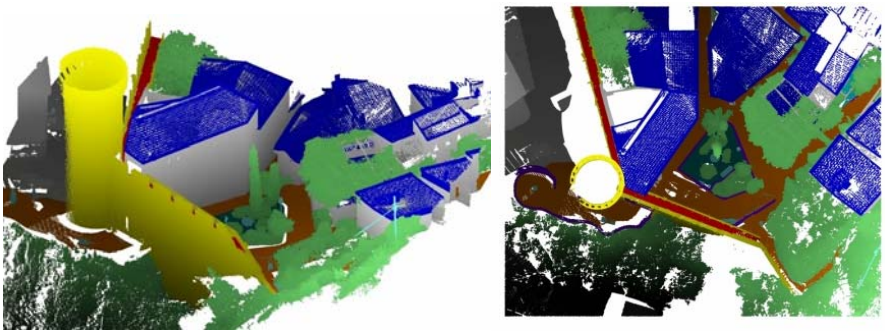
Fuente: Propia

Siendo para ello fundamental relacionar la comprensión de la información TLS con la forma de trabajar para disciplinas del patrimonio, en términos de plantas y de fachadas. Con este objetivo las nubes de puntos resultantes se llegan a dividen en cuatro tipologías, en relación a la resolución TLS, distribución de la información y complejidad. En la Ilustración 87 se ven estas tipologías en base a la información TLS, divididas en:

Ilustración 87: Clasificación características técnicas de la información TLS



Fachada Suelo Techos Vegetación



Temático por colores de la clasificación

Fuente: Propia

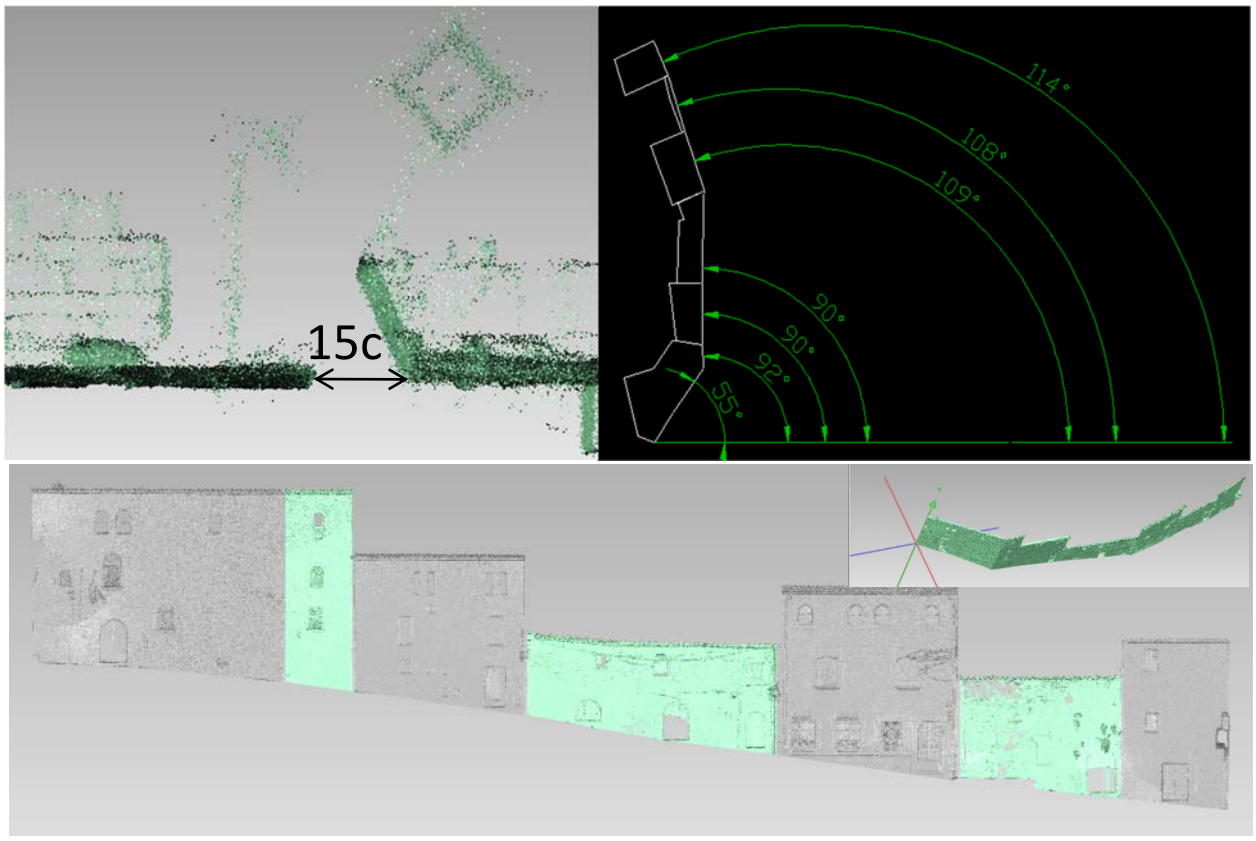
Superficies escaneadas de forma directa: Fachadas

La tipología de ciudad Medieval amurallada de Vila Vella plantea estrategias específicas para el manejo de su información, con características concretas como: una altura máxima de tres plantas, fachadas planas sin cambios volumétricos, la presencia de muros bajos, cubiertas a nivel de accesos a las viviendas, elementos urbanos específicos (iluminación, señales, pérgolas, etc.), el ensanchamiento de la muralla generando una pasarela, la intersección de la muralla con los edificios, la morfología de las torres, sus accesos, etc.

Cada una de estas características condiciona la relación de los archivos de nubes de puntos que se generan, en una estructura de análisis de plantas y fachadas. Un ejemplo de ello es el desdoblamiento de las fachadas en la Ilustración 88 e Ilustración 89.

El desdoblamiento se realiza a nivel de parcela, mediante la detección RANSAC del plano mayor, con dicho plano, se procede a calcular la rotación y traslación para que este quede en una posición exacta. Dicha información de traslación y rotación se utiliza para modificar la posición de los puntos de la fachada, siendo almacenado este dato en la misma nube de puntos en formato LAS (ALBACETE 2011).

Ilustración 88: Desdoblamiento de la información de fachada. Superior izquierda distancia entre nubes de puntos, superior derecha alineación de fachadas. Abajo fachada de la calle Oliver



Fuente: Propia

Ilustración 89: Ráster de profundidades mínimas tematizado, calle Oliver

Fuente: Propia

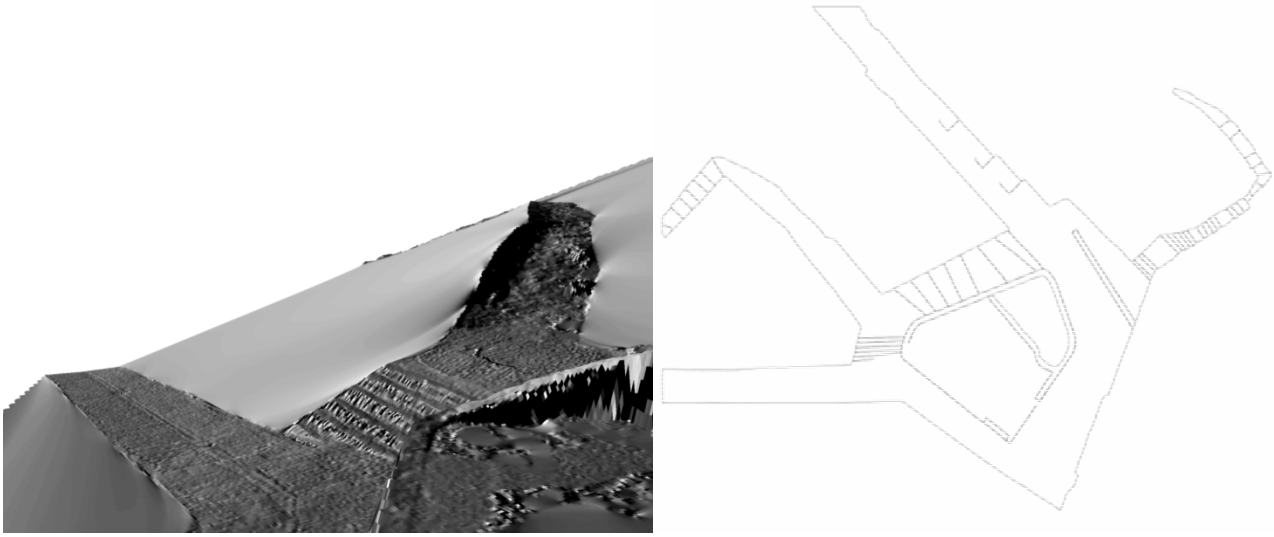
Superficies escaneadas de forma indirecta: El suelo

La complejidad del análisis del material cambia en relación al tipo de superficie, la clasificación de suelos, techo, fachada y elementos complejos resalta estas diferencias, ejemplo de ello son los problemas encontrados en el análisis del material del suelo, Ilustración 91, en este ejemplo se ven los problemas por la proximidad del escáner y el ángulo de escaneo de este tipo de superficies.

Esta información permite futuras prospecciones de restauración. La información de color digital ha sido ampliamente utilizada para el reconocimiento y registro de patologías, en la publicación de (J. L. LERMA 1999) se busca obtener informaciones precisas de los materiales, medidas de distancia, áreas de entidades arquitectónicas, y documentos estadísticos que verifican la precisión alcanzada.

En donde las imágenes métricas y la información extraída pueden administrarse directamente como capas o niveles de información en sistemas GIS y CAD, como se ve en la Ilustración 90.

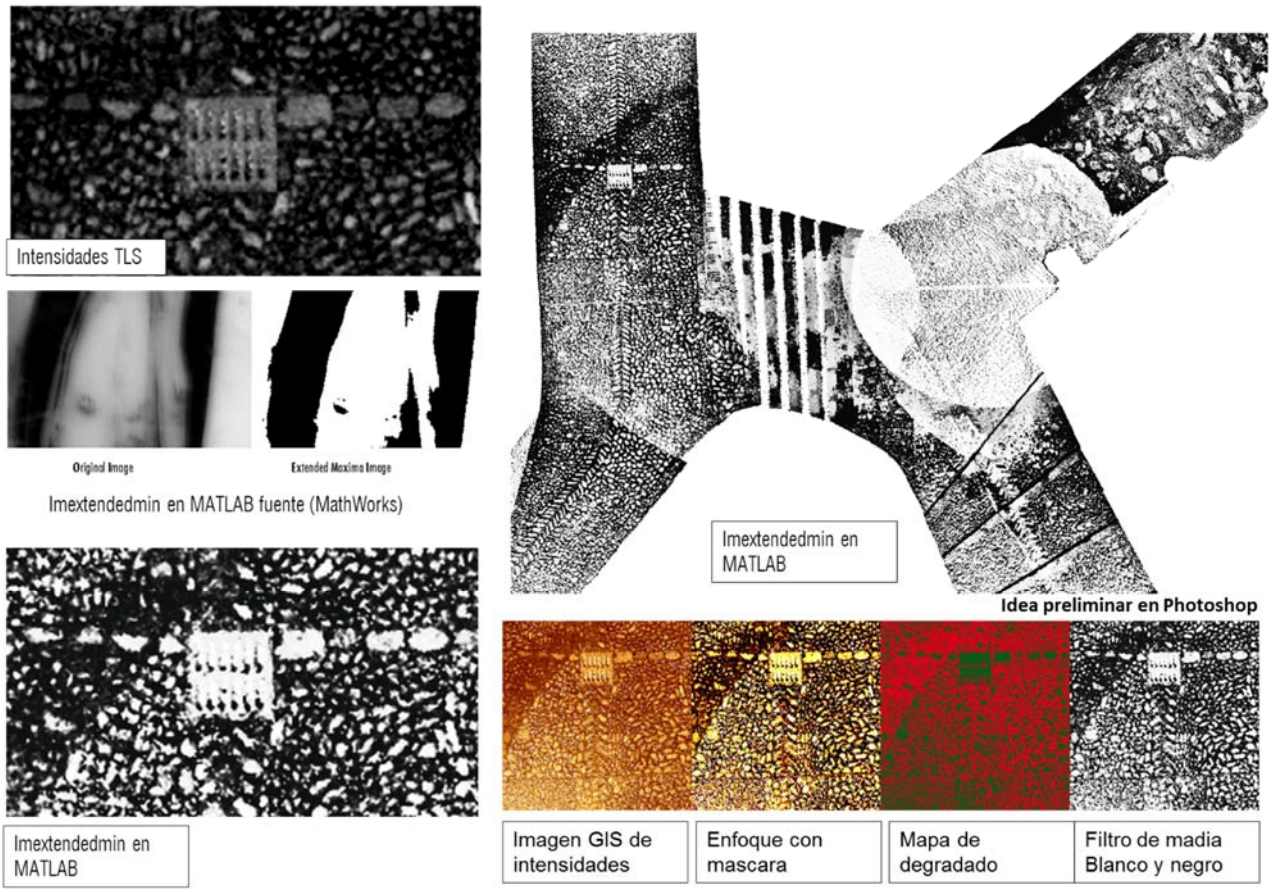
Ilustración 90: Modelos digitales de terreno y límites de los cambios de las superficies



DTM sin línea de ruptura y líneas de ruptura extraídas de una malla filtrada en sus componentes horizontales

Fuente: Propia

Ilustración 91: Identificación del material del suelo analizando la información de intensidad, buscando identificar contornos de los materiales



Imexttendedmin (mathworks 2013)

Fuente: Propia

Captura de puntos lejanos: Cubiertas

En los casos que las cubiertas son visibles desde el suelo al ser cubiertas inclinadas, se tienen nubes de puntos con una baja resolución y problemas relacionados a la incidencia angular. Por ello las cubiertas se tienen que escanear desde puntos altos, que a la distancia generan una distribución de puntos que tiende a ser homogénea, como es el caso de las cubiertas de Tossa de Mar, la cual se escaneo a diferentes alturas en diferentes puntos de la ciudad amurallada, y desde puntos de la muralla, que permiten tener una visión de las casas desde arriba.

El escáner utilizado para el levantamiento de Tossa de Mar es el Riegl z420i, con un ángulo de visión de 80º sobre la vertical, por ello el escáner se inclinó desde las murallas apuntando a las cubiertas de los edificios, en las diferentes posiciones, con ello se logró una nube de puntos que tiende a ser más homogénea que la nube desde el suelo, evitando que se vean las nubes recortadas por el ángulo del escáner, solamente se recortan por oclusiones, las nubes tienen grandes vacíos de información, dada la limitante de accesibilidad, presentando oclusiones propias de los elementos que sobrepasan a la cubierta como lo son las chimeneas.

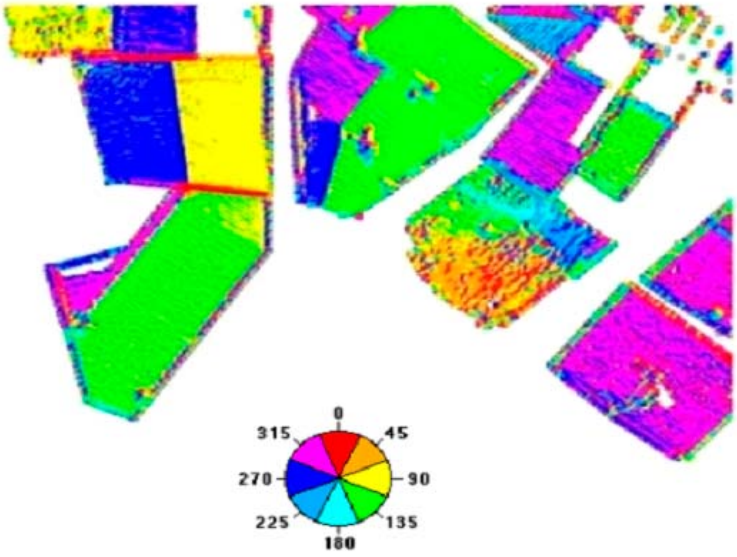
El detalle de las cubiertas descrito no permite identificar fácilmente las tejas de las cubiertas, pero si la orientación de los planos que las componen, lo cual llevo a realizar un filtrado de la nube de puntos, específicamente mediante una retícula, que define el espaciado entre puntos, con un promedio de 1 punto cada 3cm, obteniendo una nube que tiende a ser homogénea, a través de un Modelo Digital de Superficies MDS de los techos.

Gracias a este modelo se logró establecer las orientaciones de las cubiertas y su representación en un mapa de pendientes (*slope*), que se orienta al Norte, desde 0 a 360º en relación a la orientación de las cubiertas. El valor -1 indicará que no hay orientación y se trata de una superficie plana. La herramienta que permitió el análisis de la Ilustración 92 en Arcgis es Spatial Analyst – Surface Analysis – Aspect, limitado por un ráster de entrada y salida (Input y Output Ráster) y el tamaño de celda (Output CellSize),

La mayor homogeneidad de las superficies de cubierta (en comparación con el suelo por el ángulo de incidencia), permite generar ráster sin los círculos que genera la limitante angular, al ser superficies lejanas, que se han escaneado desde puntos más altos, como lo son las murallas.

La distribución de datos de las cubiertas son menos complejas que las del suelo, aun así se necesita una metodología específica en relación a sus características, en principio al ser una captura lejana, tienen baja resolución entre puntos, en comparación con otras superficies, aparte de ello se encuentran elementos de cubierta (claraboyas, antenas), que por la baja resolución son difíciles de interpretar, también existe el problema de los bordes de los tejados, en donde la cara inferior y la superior tienden a mezclarse, al ser escaneados desde abajo y desde arriba, al igual que los problemas del instrumento en los bordes, descritos en el capítulo 2.5 Análisis del error TLS. A parte de estas limitantes como nube de puntos y ráster, vemos que los procesos de mallado también se presentan al tener una baja resolución y por la indeterminación de los elementos de cubierta, lo cual se ve por ejemplo en mallas TIN.

Ilustración 92: Representación de las orientaciones de una cubierta a partir de un MDS en GIS



Fuente: Propia

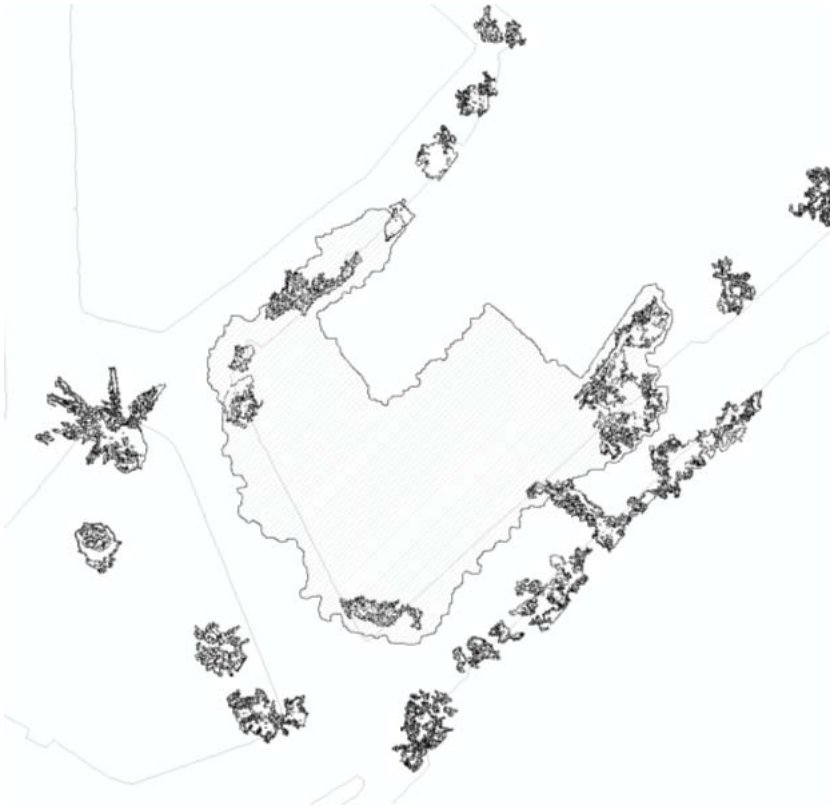
Elementos complejos: vegetación y mobiliario

La clasificación de la vegetación se realizó con el proceso CANUPO, dividiendo las hojas con la copa de los árboles. La división entre los otros elementos se realizado de forma manual, descrita a continuación:

Vegetación baja: Se consideró en esta categoría las zonas verdes menores de 3m sobre el nivel del suelo, incluyendo la vegetación sobre pérgolas y árboles de menor envergadura. Estos elementos presentan vacíos de información y el ruido por el movimiento de las hojas, que dificulta su análisis, por lo cual la resolución de partida es de 10cm el pixel y con filtros de interpolación aplicados. Posterior a ello se realizó una clasificación supervisada *Minimun Distance*en 5 regiones de interés (ROI), basadas en la altura de la vegetación, en relación a dos mapas, el de ráster mínimos y máximos incluyendo el suelo. Esta clasificación se convirtió en vectores, logrando medir estos 5 valores de forma independiente, en relación a su área y complejidad Ilustración 93.

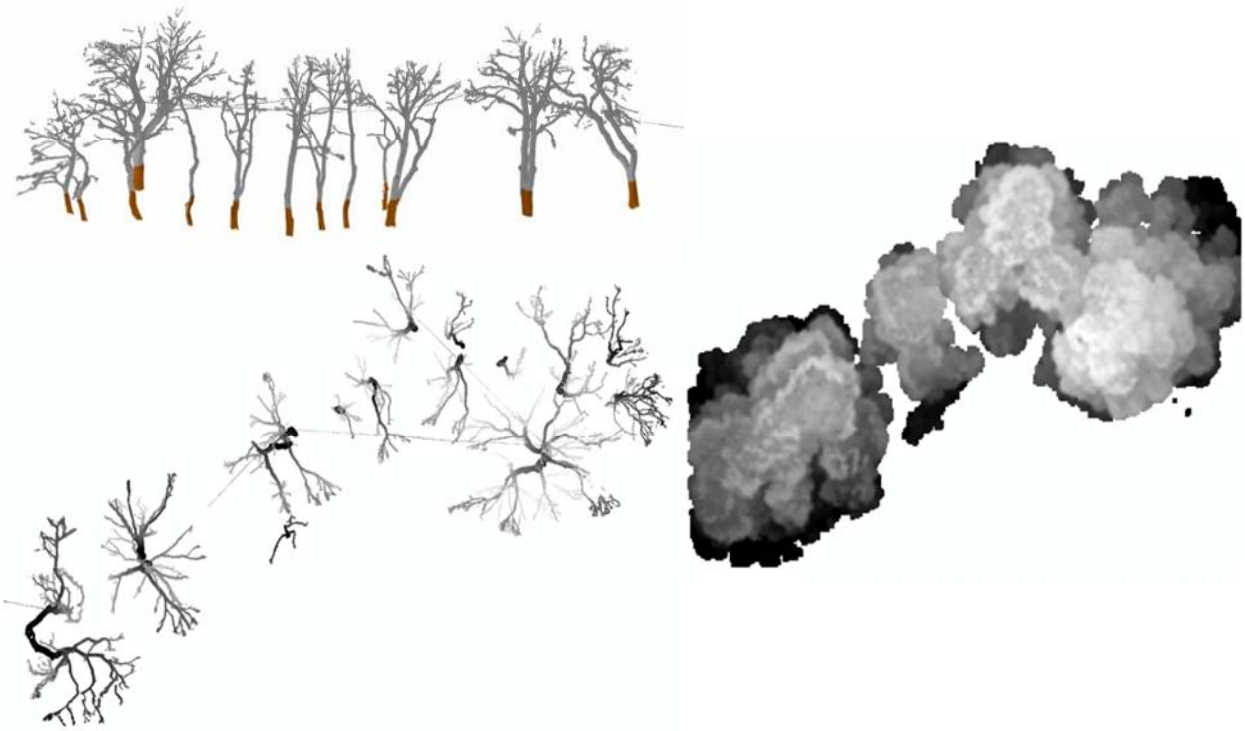
Vegetación alta: Se consideró alta la vegetación mayor de 3 metros. Por sus características necesitaba una división formal, en tronco y hojas. La zona de los troncos a su vez se secciono en dos, recortando la información que se encontraba a menos de 1 metro del suelo (para encontrar el centro del tronco en su base) y se optó por transformar la información de nube de puntos a fachada y planta. Paralelo a ello las hojas se consideraron como un continuo, una masa vegetal que puede ser medida en volumen y área ocupada, mediante las operaciones de ráster, entre imágenes de mínimos y máximos, como se ve en la Ilustración 94.

Ilustración 93: Clasificación 5 ROI y conversión en áreas vectoriales, de la vegetación baja



Fuente: Propia

Ilustración 94: Vegetación alta en fachada y planta. Izquierda troncos, derecha hojas de la copa de los árboles



Fuente: Propia

Complementario a ello es necesario destacar otras técnicas de clasificación de la información de vegetación, realizada desde bases de datos LiDAR, que permitirían explorar las bases de datos anteriormente descritas, extrayendo nuevos datos. Dada la extensión de este campo solo se realiza una referencia a dichos procesos. A continuación explicamos estos procesos de clasificación de la información de vegetación, mediante algoritmos de clasificación, mediante la detección de la vegetación en imágenes de Rango:

- **Full-Waveform-Analysis:** Los pulsos láser golpean múltiples superficies, por lo cual múltiples reflejos son recibidos por pulso, esto ocurre con frecuencia en la vegetación, en ello se basa la técnica FWA, interpretando la señal recibida con varias funciones de Gaussian, para cada uno de las medidas de rango, que dependen en la capacidad del láser escáner utilizado para recibir estas medidas múltiples (ELSEBERG 2011).
- **k-nearest neighbors (KNN):** algoritmo de clasificación de imágenes de rango de entornos urbanos
- **conditionalrandomfields (CRF):** Utiliza super-voxels para reducir la cantidad de datos para ser procesados (LIM y SUTER 2009).
- **Markov networks and support vector machines (SVM):** Adaptan la función de la técnica de gradiente max-margin en redes Markov para aprender una clasificación de modelos de hight-orden (MUNOZ 2009), para manejar una gran cantidad de datos y asumirlo en tiempos de computación Triebel, utilizando primero los procesos K-D trees antes que los asociativas redes Markov (TRIEBEL 2006).

4.4 Construcción y optimización de imágenes TLS como base de datos

Este apartado comienza con la profundización de los formatos que nos permiten manipular la información TLS, de técnicas usadas para interpretar estos datos desde diversas disciplinas y de su representación. Todo ello a partir de interpretar y explotar esta información en dos dimensiones, incluida la información de profundidad, para ampliar la información que se tiene sobre las planimetrías de los edificios patrimoniales, orientado a los profesionales que intervienen en la conservación y prevención de estos bienes.

Las técnicas que se explican provienen de diferentes campos, destacando el procesamiento de imágenes, el estudio de los formatos de almacenamiento tanto de escáneres terrestres como los aerotransportados y el manejo de la información desde el campo de la ingeniería inversa y topografía.

En cuanto a los formatos de conversión y almacenamiento de datos en 2D y 2.5D, a través de modelos que permiten estructural la codificación de la elevación y la representación de las superficies, en mallas regulares de puntos, en vectores y en rásters.

4.4.1 Malla regular de puntos.

A cada uno de los puntos se le asigna la variable medida en el punto. Destacamos los siguientes formatos:

- **ASCII y Binario:** Formatos básicos de codificación de información en un ordenador. Ambos sistemas utilizan el byte como unidad mínima de información, el cual almacena 256 valores diferentes, normalmente entre 0 – 255. El formato ASSCII (*American Estándar Code for Information Interchange)*, se basa en un sistema de codificación que asigna a cada carácter alfanumérico o de control un valor entre 0 y 255. Se puede ver un ejemplo de código ASCII en (El formato ráster. Fundamentos 2006), en donde por ejemplo 274.96 se codifica en 6 bytes [50][55][52][46][57][54] , el [46] es el valor para la coma y SIG como [83][73][71].
  Las desventajas del ASCII respecto al sistema binario son: Los archivos ASCCI llegan a ser de 2 a 4 veces más grandes. Su procesamiento informático es más lento por la transformación de los dígitos y el tamaño del archivo. El binario permite el acceso directo a los datos al tener el mismo tamaño de bytes, en relación a la fila y la columna. El ASCCI permite un acceso secuencial, uno por uno, ya que no todos los datos tienen el mismo tamaño de bytes.
- **LAS:** El formato LAS propuesto por la ASPRS (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*), está ideado para contener datos en forma de puntos LiDAR, mediante programas que combinen la información GPS (Sistemas de Posicionamiento Global), IMU (Unidad de Medida Inercial) y datos de rango de pulso láser para producir datos definidos por las coordenadas X, Y, Z. El objetivo de esta asociación es estandarizar un formato para las compañías del sector ALS, aceptado por las grandes empresas para almacenar todos los atributos LiDAR. Almacena los atributos en formato binario, incluyendo tiempo GPS, datos de orientación inercial, X, Y, Z. La ventaja de este formato es que todos los atributos finales clasificados se almacenan en una tabla de bases de datos, lo que permite a los usuarios manejar un único archivo que permite generar gran variedad de productos y realizar multitud de análisis.

El apartado LAS contempla las *geo data bases* personales, son estructuras de estas bases de datos son genéricas y permiten flexibilidad a la hora de almacenar y exportar datos LiDAR en otros diseños de bases de datos. Los archivos .LAS contienen los datos registrados de los puntos LiDAR. Los datos se almacenan en este formato que combina la información de posicionamiento (GPS), los datos inerciales del avión (INS/IMU) y el rango de datos de los pulsos láser que permite obtener los datos X, Y, Z de cada punto. El objetivo del uso de este formato de datos es proporcionar un formato abierto que permita manejar los datos LiDAR en cualquier equipo y con programas específicos. También hay bases de datos SIG diseñadas para LiDAR, estos modelos de bases de datos desarrollados por algunas empresas permiten almacenar todos los atributos LiDAR.

- **Formatos comerciales en relación a los escáneres:** Existe un abanico amplio de formatos TLS, en relación a las empresas que desarrollan la tecnología. Entre ellos: Terrascan .BIN, Topcon .CL3, Faro .FLS .FWS, LAS, Leica .PTG, LEICA .PTS, Leica .PTX, Riegl .3DD .RDB .RSP .RXP
- **Formatos de programas gratuitos TLS:** Existen programas de fuente abierta o gratuita que profundizan nuevas líneas de administración de datos TLS, permitiendo almacenar más información en el valor de punto que la que registran los escáneres. Destacamos los formatos PLY (usado por ejemplo en Meshlab) y BIN usado en cloudcompare. El formato PLY (*Polygon File Format* también conocido como *Stanford Triangle Format*) utiliza el cabecero para estructurar la información, por medio de un *wizard*, ya sean mallas, puntos, formato ASCCII o binario, puede almacenar: Color, transparencia, normales, coordenadas texturas. Formato BIN, puede almacenar: coordenadas, normales, color, rango gris, valor escalar SF, RGBAi, RGBAf.

Es importante destacar la información que se puede almacenar como valor escalar sf, *Tabla 4*, en este campo se pueden realizar múltiples operaciones o análisis de la nube de puntos, desde procesos de iluminación, de clasificación, análisis de la superficie, llegando a realizar operaciones entre nubes de puntos. La mayoría de extensiones de programas comerciales carecen de este campo, restringiendo las operaciones que se pueden llevar a cabo con una nube de puntos.

Tabla 4: Información almacenada, destacando los valores escalares SF

Extensión	Tipo	RGB	Nivel grises	Normal	SF	Otros	Descripción
ASC, TXT, NEU, XYZ	ascii	X	X	X	**X**		ASCII, puntos
BIN	binario	X		X	**X**		(CloudCompare) puntos
PLY	ascii / binario	X	X	X	**X**	X	(Stanford) Puntos y mallas
LAS dataset	binario	X	X			X	LiDAR puntos, vectoriales

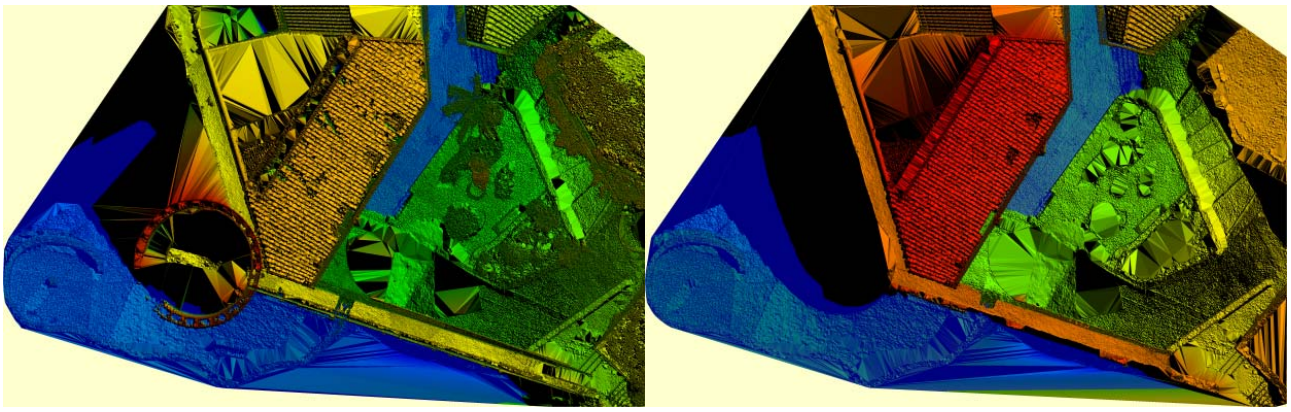
Fuente: Propia

4.4.2 Vectorial

Isolíneas: Son líneas en las que el identificador se sustituye por el valor de la variable. Se utilizan los siguientes formatos:

- **Curvas de nivel:** Se construye a partir de líneas, como sucesión de pares de coordenadas, que tienen como identificador un valor de elevación en cada punto de la línea, generalmente este valor de las curvas es constante. Se pueden generar o interpolar a partir de los campos de elevación de los datos LiDAR y apoyándose en las líneas de ruptura. Son muy precisos debido a la elevada densidad de puntos de la base LiDAR.
- **Shapefile:** es el formato por excelencia de ESRI, rápido y fácil de editar, permite almacenar los campos de información de los datos LiDAR. Sin embargo, en el caso de que no se haya generado directamente, hay problemas para transformar los archivos .las en shapefiles, debido a su codificación binaria.
- **Mallas libres:** Sus vértices se concentran en aquellas zonas son de la variable representada tiene mayor variabilidad. En los SIG se utilizan el formato TIN.
- **Red Irregular de Triángulos TIN:** son conjuntos de triángulos formados por tripletas de puntos cercanos no colineales, formando un mosaico. Generalmente parten de curvas de nivel tras descomponerse en conjuntos de puntos, o de Modelos Digitales de Terreno MDT, en el cual el número de triángulos se define por los puntos más relevantes que definen el cambio de pendientes.

Ilustración 95: Izquierda TIN generado a partir de toda la nube de puntos sin clasificar. Derecha TIN del suelo y techos (cenital) de la misma selección, con un falso color que representa la altura



Fuente: Propia

Estos triángulos se rigen por unas reglas básicas: no tienen solapes y se basan en líneas de ruptura para marcar entidades lineales concretas. Se pueden generar y exportar automáticamente por parte de la mayoría de los programas de procesamiento LiDAR, como se ve en la Ilustración 95, la cual pretende diferenciar una malla TIN de la información completa de un levantamiento y de un TIN que parte de una nube de puntos clasificada, en los elementos que definen las superficies que tienden a ser horizontales, como el suelo y el techo, eliminando el ruido causado por los árboles, cables, vacíos de información y los elementos verticales que impiden tener una lectura en planta de las pendientes de suelos y techos.

4.4.3 Ráster y Grids

Ráster: El espacio de trabajo se divide en celdas o teselas, en una matriz, que suele definirse por su altura, anchura (filas, columnas) y por su profundidad de color. En este formato no pueden aparecer objetos que coincidan en el espacio. Los datos almacenados en formato ráster pueden ser datos temáticos, datos continuos (representan fenómenos como temperatura o elevación), o imágenes escaneadas, dibujos, fotografías, etc.

Las ventajas de los formatos ráster permiten: estructurar los datos en matrices simples, en ocasiones vinculadas a una tabla de atributos; es un formato que permite un análisis espacial y estadístico avanzado; permite representar superficies continuas y llevar a cabo el análisis de superficies; con estas bases se puede llevar a cabo superposiciones rápidas con datasets complejos, etc.

Como aspectos a tener en cuenta encontramos que: podrían producirse imprecisiones espaciales, debido a los límites impuestos por las dimensiones del dataset ráster; los dataset ráster suelen ser de gran tamaño, a mayor resolución mayor el tamaño de los ficheros; se produce una pérdida de precisión que ocasionará una restructuración de datos a un límite de la celda ráster.

Grids: son conjuntos de celdas equidistantes que tienen un atributo de elevación asociado al centro de cada celda. La resolución del tamaño de la celda depende de la aplicación o de la precisión requerida.

4.5 Estructurar la información de 3D a 2D y 2.5D

Los formatos de partida son los que se utilizan en las casas comerciales de cada escáner. Estos programas regulan el aprovechamiento de los datos, en función a las posibilidades de exportación, sin que exista una pérdida considerable de información. Igualmente los programas libres se ven regulados por estos formatos, desarrollados en su mayoría por los formatos usados en cada casa comercial y a los estándares básicos de esta tecnología.

Los programas libres utilizados, han permitido estructurar la información utilizando los valores escalares de la siguiente forma:

- Nuevas capas de información como análisis de curvatura o rugosidad
- Clasificar la información sin eliminar otras informaciones
- Combinar técnicas de clasificación operando los resultados a modo de capas de información, ejemplo Ilustración 96.
- Realizar operaciones entre capas de información, como multiplicar la iluminación con la clasificación, como una forma de visualizar la información

Las nubes de puntos TLS pueden contener diversos tipos de información, desde cuantitativa como la clasificación, como cualitativa como el color. Algunos de los valores que podemos almacenar son:

- Rojo, verde, azul
- Intensidad TLS
- Iluminación por oclusión ambiental
- Rugosidad
- Curvatura

- Normal TLS nx, ny, nz
- Normal horizontal
- Normal Vertical
- Clasificación RANSAC, formas geométricas
- Clasificación CANUPO, superficies naturales

Ilustración 96: Operaciones entre categorías en una nube de puntos

A) Normales en sentido horizontal B) iluminación por oclusión ambiental C) Multiplicación entre categorías.

Fuente: Propia

4.5.1 Formato LAS y construcción basada en datos TLS

El formato viene definido por datos binarios consistentes en:

- **Cabecera:** El formato .las contiene datos binarios que consisten en archivo cabecera, registros de longitud variable y datos de puntos. Algunos archivos .las contienen datos de la forma de la onda. Todos los datos están en formato *little-endian*. El archivo cabecera contiene los datos genéricos como el número de puntos y el área de cobertura seguidos de los registros de amplitud variable. Estos últimos contienen diferentes datos como la proyección, los metadatos, la forma de la onda o las aplicaciones.
- **Información de georreferenciación:** La georreferenciación[59] del formato .las usa el mismo mecanismo que el desarrollado para el formato estándar *GeoTIFF*. Los registros de cabecera de longitud variable contienen los mismos datos que los registros clave de los archivos *TIFF* en un *GeoTIFF*. Partiendo de estas premisas, cualquier desarrollo de software orientado a la interpretación de archivos .las puede apoyarse en los mismos principios que la lectura de archivos *GeoTIFF,* excepto aquellos registros referidos a los datos ráster.
- **Metadatos:** Los metadatos permiten conocer los parámetros de captura de los datos, su precisión, su procesamiento, su control de calidad. Hay que tener en cuenta que cada

[59] *"Georreferenciación: con respecto a la localización de los píxeles hemos de tener en cuenta que no siempre disponemos de un ráster georreferenciado por lo tanto puede disponer de coordenadas fila y columnas, sin disponer de una referencia espacial determinada (Sistema de Referencia Espacial). En algunas ocasiones para proceder a la localización espacial de dicho ráster hemos de realizar una georreferenciación, u Ortorectificación si dicha localización conlleva la corrección del efecto del relieve, orientación interna y externa del ráster etc. (nos referimos por tanto en este caso a Fotografías Aéreas, pero podría georreferenciarse cualquier otro ráster si disponemos de información de referencia)."* Fuente: Análisis Espacial con Datos Ráster en ArcGIS Desktop 9.2.

conjunto de datos está asociado con un archivo de metadatos, por lo que si se subdivide en secciones o se une a otros conjuntos de datos pueden encontrarse diferencias entre los metadatos.

- **Los valores:** x, y, z se almacenan como enteros largos. En archivos de vuelos aéreos LiDAR o escáneres trasportados en coches se combinan con los valores de escala y de compensación (INS) para determinar las coordenadas de cada punto.
- **El valor de intensidad:** Para un LiDAR aéreo es un entero que representa la magnitud del retorno del pulso láser. Para escáneres terrestres se basa en la medición de la fuerza de la señal de retrodispersión, consultar capítulo 2.8.1 Información de intensidad entre escáneres TLS.
- **El identificador del punto:** indica el orden de captura de los puntos.

Ilustración 97: Ejemplo de formato LAS, formato 3

Elemento	Formato	Tamaño
X	long	4 bytes
Y	long	4 bytes
Z	long	4 bytes
Intensidad	unsigned short	2 bytes
Retorno	3 bits (bits 0, 1, 2)	3 bits
Nº de retornos (pulso)	3 bits (bits 3, 4, 5)	3 bits
Flag de dirección escaneado	1 bit (bit 6)	1 bit
Lado de línea de vuelo	1 bit (bit 7)	1 bit
Clasificación	unsignedchar	1 byte
Ángulo de escaneado (-90 to +90) – lado izquierdo	char	1 byte
Datos de usuario	Data unsignedchar	1 byte
Identificador ID	unsigned short	2 bytes
Tiempo GPS	double	8 bytes
rojo	unsigned short	2 bytes
Verde	unsigned short	2 bytes
Azul	unsigned short	2 bytes

Fuente: *(ASPRS 10 Junio 2012)*

Los siguientes cuatro valores se almacenan como campos de byte, para levantamientos LiDAR aereos:

- **Retorno:** Un único pulso puede tener varios retornos, especificando el orden de retorno según vuelve la señal. La capacidad de diferenciar múltiples retornos de los pulsos láser es la principal ventaja de los LiDAR aerotransportados. Anteriormente estos sistemas solo daban información acerca del primer y el último retorno. El número de retornos y su orden proporciona importante información para posteriores clasificaciones. Por ejemplo, los datos de un punto láser puede ser el segundo retorno con un número total de retornos de cinco.
- ***Flag* de Dirección de Escaneo:** Este *flag* denota la dirección en la que el espejo que realiza la recogida de datos estaba viajando en el momento de lanzar el pulso. Un valor de

bit a 1 es dirección de escaneo positiva y un valor 0, dirección negativa.

- **Lado de la línea de vuelo:** El bit de datos del lado de la línea de vuelo tiene valor 1 sólo cuando el punto está al final de una línea de escaneo, es decir, indica un cambio de dirección.
- **La clasificación:** representa los atributos de clase de un punto. Si un punto no se clasifica debe ser 0.

Tabla 5: Comparación entre formatos de almacenamiento LAS versión 1.4

ATRIBUTOS/FORMATO	0	1	2	3	4		5	6[60]	7	8	9	10	TLS Terrestre
X, Y, Z	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X
Intensidad	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X
Retorno	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	-
Nº de retornos (pulso)	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	-
Flag de dirección escaneado	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	-
Lado de línea de vuelo	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	-
Clasificación	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X
Ángulo de escaneado	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	-
Datos de usuario	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X
Identificador ID	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	-
Tiempo GPS	-	X	-	X	X		X	X	X	X	X	X	-
R, G, B	-	-	X	X	-		X	-	X	X	-	X	X
Descripción de onda	-	-	-	-	X		X	-	-	-	X	X	-
Datos de onda	-	-	-	-	X		X	-	-	-	X	X	-
Tamaño de onda	-	-	-	-	X		X	-	-	-	X	X	-
Localización punto de retorno	-	-	-	-	X		X	-	-	-	X	X	-
X(t)[61], Y(t), Z(t)	-	-	-	-	X		X	-	-	-	-	X	-
Puntos clasificación[62]	-	-	-	-	-		-	X	X	X	-	X	-
Canal del escáner[63]	-	-	-	-	-		-	X	X	X	-	X	-
NIR[64]	-	-	-	-	-		-	-	-	X	-	X	-

Fuente: Resumen a partir de las especificaciones *(ASPRS 10 Junio 2012)*

[60] *"Point Data Record Format 6 contains the core 30 bytes that are shared by Point Data Record Formats 6 to 10. The difference to the core 20 bytes of Point Data Record Formats 0 to 5 is that there are more bits for return numbers in order to support up to 15 returns, there are more bits for point classifications to support up to 256 classes, there is a higher precision scan angle (16 bits instead of 8), and the GPS time is mandatory."* Fuente: (ASPRS 10 Junio 2012)

[61] *"X(t), Y(t), Z(t): These parameters define a parametric line equation for extrapolating points along the associated waveform. The position along the wave is given by: X = X 0 + X(t), Y = Y0 + Y(t), Z = Z0 + Z(t). where X, Y and Z are the spatial position of the derived point, X0, Y0, Z0 are the position of the "anchor" point (the X, Y, Z locations from this point's data record) and t is the time, in picoseconds, relative to the anchor point (i.e. t = zero at the anchor point). The units of X, Y and Z are the units of the coordinate systems of the LAS data. If the coordinate system"* Fuente: (ASPRS 10 Junio 2012)

[62] Puntos de clasificación (*ClassificationFlags*): Indican características especiales asociadas a un punto. En tres valores *"0 Synthetic, 1 Key-point, 2 Withheld, 3 Overlap*". Fuente: (ASPRS 10 Junio 2012)

[63] *"Scanner Channel: Scanner Channel is used to indicate the channel (scanner head) of a multichannel system. Channel 0 is used for single scanner systems. Up to four channels are supported (0-3)".* Fuente: (ASPRS 10 Junio 2012)

[64] NIR: (near infrared) valor de canal asociado a cada punto

El ángulo de escaneado es un campo de un solo byte con un rango entre -90 y +90. Es el ángulo en el que el punto láser es disparado desde el avión. El valor 0 representa el nadir, mientras que el valor negativo indica el lado izquierdo del avión.

Al igual que los datos LiDAR de escáneres aerotransportados los datos TLS requieren una serie de filtros antes de su explotación, como procesos de depuración que corrigen errores de los censores y limitantes del postproceso.

Tabla 6. Ejemplo aplicado de valores máximos y mínimos de cada campo en el archivo LAS original de Cerro Muriano

Campo	Mínimo	Máximo
X	348000.01	351000.0
Y	4209000.0	4211999.99
Z	212.78	582.68
Intensidad	0.0	79.0
Ángulo	-50.0	38.0
N: Número de impactos	1.0	3.0
R:Identificador de impacto	1.0	3.0
Clasificación:	1.0	1.0
U: Datos de usuario	247.0	250.0
P: Identificador de fuente de puntos	4.0	6.0
E: Lado del avión	0.0	1.0
D: Dirección de escaneo	0.0	1.0
T: Hora GPS	35258.809293	36226.705776

Fuente: (GARCIA 2008)

Tabla 7: Estándar clasificación LiDAR ASPRS, para los formatos 6-10

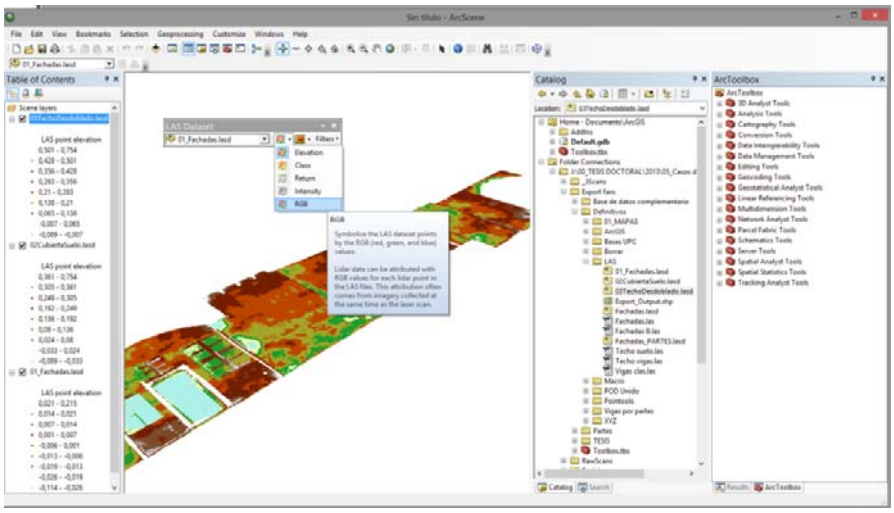
Valor clases	**Clases**	**Valor clases**	**Clases**
0	Creado, nunca clasificado	**11**	Superficies de vías
1	Sin clasificar	**12**	Reservado
2	Suelo	**13**	*Wire – Guard (Shield)*
3	Vegetación baja	**14**	*Wire – Conductor (Phase)*
4	Vegetación media	**15**	Torre de trasmisión
5	Vegetación alta	**16**	*Wire-structure Connector (e.g. Insulator)*
6	Edificios	**17**	Cubierta de puente
7	Puntos bajos (ruido)	**18**	Ruido alto
8	Reservado	**19-63**	Reservado
9	Agua	**64-255**	Definido por el usuario
10	Ferrovías		

Fuente: *(ASPRS 10 Junio 2012)*

4.5.2 De LAS a RÁSTER

Construcción LAS dataset: El objetivo de transformar una nube de puntos en un LAS dataset es almacenar la información en una estructura concreta, una nube de puntos con topología que permita su posterior manipulación, el ejemplo desarrollado parte de una nube de puntos que solo contiene los valores de color, profundidad e intensidad, descritos con anterioridad, pero se plantea que el mismo proceso se puede llevar a cabo con nubes con más información, como por ejemplo la clasificación de los puntos, lo cual permitiría un desarrollo mayor en el proceso descrito a continuación (Ilustración 98).

Ilustración 98: Ejemplo de interacción con la información en un LAS DataBase



Fuente: Propia

La conversión de LAS en una imagen ráster depende del uso final de esta. En el caso de estudio se tomaron los siguientes valores:

Intensidad:

- La asignación de la celda tomará el valor medio de los puntos que contenga dicho espacio.
- No se utiliza ningún valor de interpolación, este proceso se realiza en pasos posteriores sobre la imagen ráster.
- No se triangula como malla.
- Se utiliza un valor flotante, por las características de la información de intensidad, en rangos de 0 a 1.
- El tamaño de la celda es de 0,0005m
- No se contempla ningún factor de escala.

RGB:

- La asignación de la celda tomará el valor medio de los puntos que contenga dicho espacio.
- No se utiliza ningún valor de interpolación, este proceso se realiza en pasos posteriores sobre la imagen ráster.
- No se triangula como malla.
- Se utiliza un valor integral de 0 a 256.
- El tamaño de la celda es de 0,0005m

- No se contempla ningún factor de escala.

Elevación:

- La asignación de valor de celda toma el valor mínimo de los puntos que coincidan en dicho espació, ya que un valor de media promediaría los errores de unión entre los registros, aunque muy bajos al ser un promedio se aumenta el ruido de elementos considerados planos. Se toma el valor mínimo por la importancia de las hendiduras como las grietas, las cuales según la posición TLS y el ángulo de incidencia permiten tener datos que determinen de forma más acertada la profundidad de elementos como fisuras.
- No se triangula como malla.
- Se utiliza un valor flotante, por las características de la información de intensidad, en rangos de 0 a 1.
- El tamaño de la celda es de 0,0005m
- No se contempla ningún factor de escala.

Modelos de Análisis Espacial con herramientas de diagramas de geoprocesamiento de datos LiDAR (Model Builder)

Este apartado se centra en las herramientas a utilizar para almacenar los datos desde la nube de puntos LAS, a una serie de bases de datos como imágenes ráster, de forma ágil y compacta. La elección del conjunto de bases de datos a rásterizar depende de las características del estudio.

Las herramientas de análisis ráster nos permiten modelar superficies con datos, utilizando la información TLS como elementos de entrada, aplicando a ellos funciones, parámetros y variables de salida, que a su vez pueden ser utilizadas para otras operaciones, en el mismo modelo de geoprocesamiento.

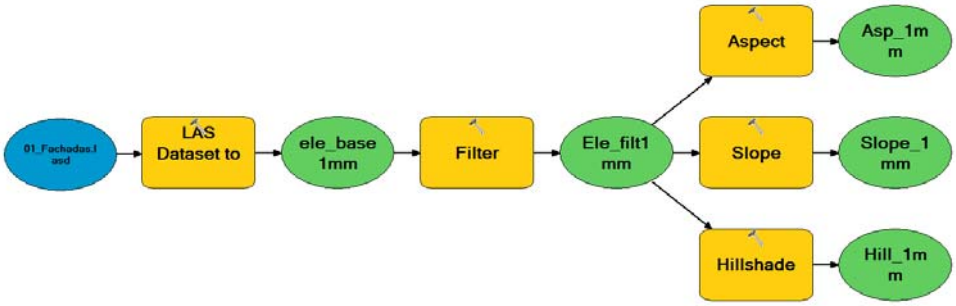
El modelo de geoprocesamiento propuesto se desarrolla con la herramienta ArcToolbox, sobre la cual se vincula desde la tabla de contenidos a la herramienta Arctoolbox cada uno de los elementos.

La Ilustración 98 es un modelo que permite crear bases de datos ráster para el almacenamiento de datos LiDAR, el ejemplo de esta imagen se refiere solo a análisis que tienen relación a la topografía de las superficies. Nos permite realizar la transformación de los archivos LAS, en imágenes ráster, posicionando estas bases de datos y atributos, en fusión del conjunto de bases de datos registradas, realizando las siguientes acciones:

- **LAS dataset to rater.** Pasar de entidad de multipuntos a entidad de puntos con valores de elevación.
- **Función de filtrado del rater.** Crear una imagen de elevación interpolando los pixeles que no tienen información a una distancia de 3 pixeles como máximo.
- **Función de geoprocesamiento de pendientes (Aspect).** Crear una imagen de orientaciones[65] a partir de la elevación interpolada
- **Función de geoprocesamiento de pendientes (Spatial Analyst Tools – Surface - Slope).** Crear una imagen de pendientes a partir de una elevación interpolada
- **Función de geoprocesamiento de pendientes (Hill).** Crear una imagen que simule una iluminación.

[65] *"Orientación: Se denomina con este vocablo al ángulo formado por el norte y la dirección definida por las columnas de la retícula o ráster, siendo habitual que su valor sea 0."* Fuente: Análisis Espacial con Datos Ráster en ArcGIS Desktop 9.2.

Ilustración 99: Modelo de creación de una Geodatabase basado en la información de elevación



Fuente: Propia

También se han realizado otros modelos de geoprocesamiento que buscan extraer otro tipo de imágenes, partiendo de otros inputs

- Crear una imagen de intensidad a partir de los datos LAS del TLS y los atributos RGB, añadiendo una función de filtrado de cada una de las capas del ráster, Ilustración 100.
- Crear una imagen de intensidad a partir de los datos LAS del TLS y su atributo de intensidad, Ilustración 100.

Ilustración 100: RGB TLS filtrado en cada canal e intensidad TLS, filtrado y representado en falso color. Murales de Sant Miquel

Fuente: Propia

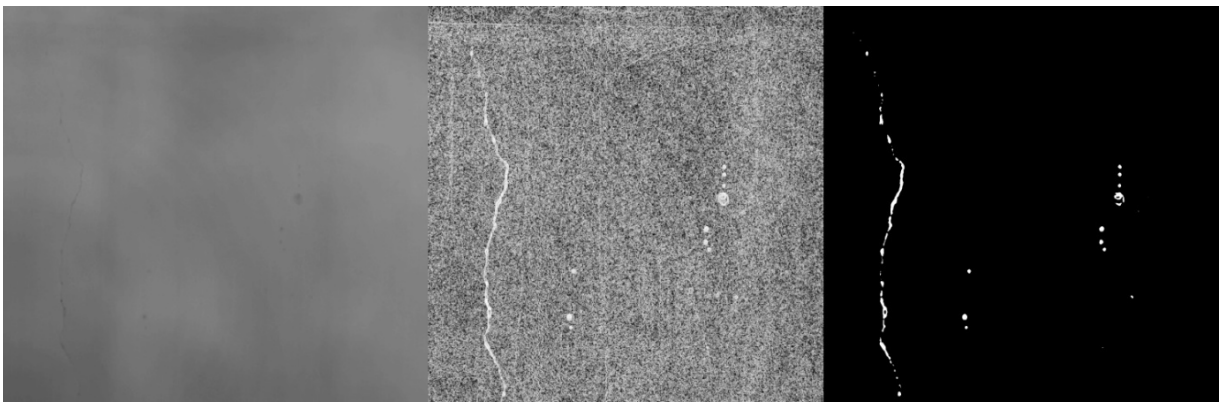
Procesos de filtrado:

- Técnicas para el manejo del ruido tanto en 3D, como en la construcción y procesamiento de imágenes. Ventajas y desventajas de filtros que suavizan y/o promedian la superficie.
- Procesos de interpolación (Interpolación IDW, Spline, Natural Neighbor, topo to Ráster, Trend, Kriging)
- Manejo errores en la etapa de postproceso: errores instrumentales, errores relacionados con los objetos escaneados, afectaciones por condiciones ambientales y errores metodológicos.

El proceso puede continuar realizando operaciones entre los ráster obtenidos.
Función de álgebra de mapas simple (**Spatial Analyst Tools – Map Algebra - Single Output Map Algebra**).

Las capas ráster se componen de números, sobre los cuales se pueden realizar operaciones, entre capas de entrada que generan capas de salida. Estas operaciones permiten realizar operaciones entre mapas, por ejemplo de un modelo de mapas de pendientes podemos tomar las superiores a 30 grados con aéreas de un tamaño específico, como se ejemplifica en la Ilustración 101.

Ilustración 101: Detalle de una fisura y huecos de una de las pinturas de los murales de Sant Miquel



A B C

A) Modelo digital de elevaciones del mural (capa de entrada) B) Análisis de pendientes C) Selección por pendiente y área (capa de salida)

Fuente: Propia

Según diferentes autores las operaciones se pueden realizar entre una o más capas, en la publicación (FELICÍSIMO s.f.) se ordenan de la forma siguiente:

Operadores locales: Mediante operaciones se genera una nueva capa: estas pueden ser aritméticas, funciones lógicas (and, or,xor,not), relaciones (>, >=, <, <=, ==, !=), trigonométricas (sen, cos, tan, ...) o condicionales.
Operadores de vecindad o focales: Genera una capa en la que el valor de la celda está en función del conjunto de las celdas continuas, el conjunto para una celda se llama vecindad, en números impares.

- **Filtrados de capas:** las cuales que mueve una ventana (ejemplo de 3x3) por toda la capa adjudicando valores a las (9) celdas que abarca.
- **Operadores estadísticos:** calculo estadístico para los valores que conforman una vecindad (media, desviación estándar, mínimo, máximo, diferencia, etc.), adjudicando este valor a la celda central de la capa de salida.
- **Operadores direccionales:** Permite estimar parámetros basados en la ubicación, como pendiente, orientación, curvatura, entre otros, en el conjunto de valores de la vecindad.

Operadores de bloque: Permite llevar a cabo cambios de escala en capas ráster, asignando el mismo valor a modo de bloque sobre las ventanas que verifica, definiéndose ventanas de cualquier tamaño, no solo impares como en el caso de operaciones por vecindad.

Operadores de área extendida: Busca determinar zonas con características similares, a partir de un criterio preestablecido. Se puede clasificar estos operadores en:

- Identificación de polígonos homogéneos en mapas de variable cualitativa.
- Áreas situadas a una distancia inferior a un valor umbral (de un objeto definido por una o varias celdillas tipo buffer).
- Líneas de flujo y cuencas de drenaje.
- Cuencas visuales (visibilidad desde un punto y área desde la que dicho punto es visible)

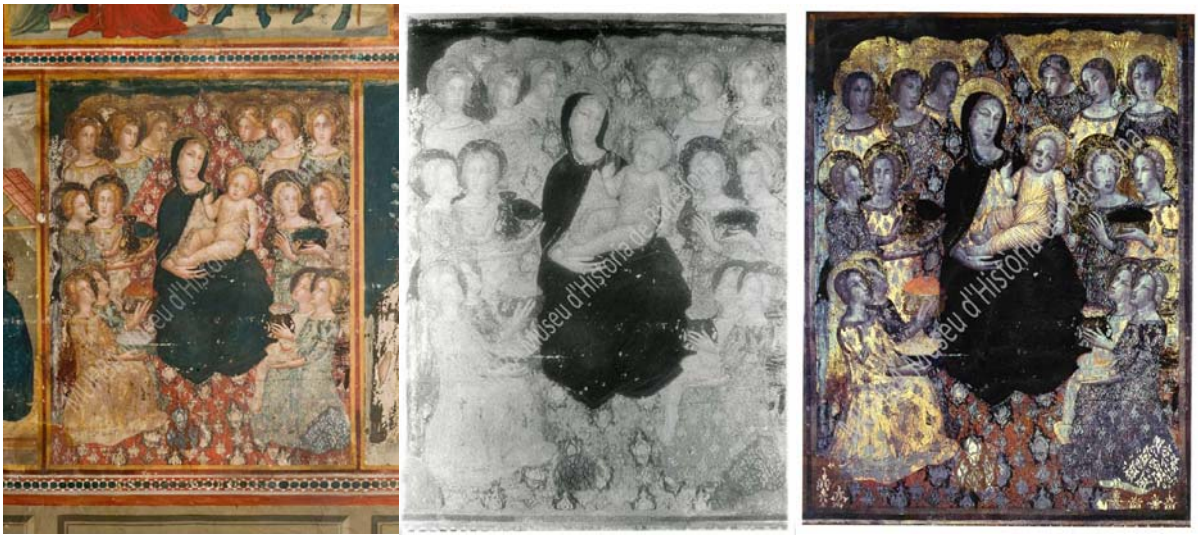
Operadores globales: Se basan en la distancia y afectan toda la capa ráster. Se distinguen:

- Operador distancia euclidiana, entre las caldas y una serie de entidades
- Operador distancia ponderada, introduciendo el concepto de fricción
- Operador entidad más cercana, para cada celda identificando la celda más cercana
- Operador extendido línea de flujo, la cual permite determinar la distancia más corta entre dos puntos teniendo en cuenta los diferentes factores que influyen en el coste de atravesar una celda.

Operadores de área: Son aquellos que calculan algún parámetro (superficie, perímetro, índices de forma, distancias, estadísticos) para una zona previamente conocida.

Corregistrar, ortorectificar o georreferenciar: El partir de una información fiable y de una metodología que minimiza la intervención manual por parte del técnico, que desarrolla las imágenes ráster, permite tener una base fiable, sobre la cual referenciar otras bases de datos, ejemplo de ello son otras técnicas, que ya son estándares para el análisis de pinturas, como el infrarrojo, ultravioleta o fotos de alta resolución, como las mostradas en la Ilustración 102.

Ilustración 102: Base de datos complementarios



RGB Reflectografía (infrarrojo) IR Fotografía UV

Fuente: Museo de Historia de Barcelona.

4.5.3 Modelos Digitales 2D y 2.5D

"Un modelo es un objeto, concepto o conjunto de relaciones que se utiliza para representar y estudiar de forma simple y comprensible una porción de la realidad empírica" (ARACIL 1986)

En la publicación de (FELICÍSIMO s.f.) se plantea que el modelo debe ser al menos parcialmente reversible a las propiedades de la realidad, también `menciona que el modelo sirve para responder a cuestiones sobre la realidad que no serían accesibles mediante la experimentación directa.

Estructura de los MDE. Unidad básica del MDE es el punto acotado X,Y,Z.

- **Modelo Vectorial:** basado en entidades u objetos geométricos definidos por las coordenadas de sus nodos y vértices. Se representa mediante puntos, líneas o polígonos con sus respectivos atributos.
  Los puntos se definen mediante un par de valores de coordenadas con un atributo de altitud.
  Las líneas mediante un vector de puntos.
  Polígonos mediante la agrupación de líneas.
  Las estructuras vectoriales más representativas se basan en isohipsas o contornos (contornos de altitud constante) y la red irregular de triángulos irregulares adosados TIN (triangulated irregular network)
- **Modelo Ráster:** basado en localizaciones espaciales, a cada una de las cuales se les asigna el valor[66] de variable para la unidad elemental de superficie. Con distribución regular sin solapamientos, compuesta por celdas o teselas.
  Las estructuras ráster más representativas: las matrices regulares URG (*uniform regular grid, son mallas de celda cuadrada*) y las matrices jerárquicas (*quadtrees,* son matrices imbricadas en una estructura jerárquica)

En la práctica los Sistemas de Información Geográficos se centran en dos alternativas las matrices regulares y los TIN, y para realizar análisis espaciales se suele optar por matrices rectangulares, en el tratamiento de Modelos Digitales de Terreno, porque aunque los TIN son capaces de representar con fidelidad la topografía por su capacidad de adaptarse al terreno con un nivel variable de resolución, dificultan desarrollar modelos o cálculos con la facilidad de las matrices. Las matrices han demostrado que son estructuras mucho más simples conceptualmente y más adaptadas al procesamiento informático.

En modelos digitales extensos se utiliza matrices divididas en elementos denominados losas o baldosas (en inglés tiles), este conjunto de divisiones permite una gestión más eficiente de la información, ya que no exige el manejo global de una matriz de grandes dimensiones, manteniendo una resolución fija, siendo una estructura más compleja que una simple matriz regular.

Estructura de modelo digital

[66] *"Valor: se trata del valor como su nombre indica almacenado en cada una de las celdas del ráster (es decir, un único valor por celda y capa o banda). Estos valores podrán ser números enteros o reales (con cifras significativas y decimales), produciendo éstos últimos mayor consumo de recursos de hardware. También es posible almacenar valores textuales pero la mayoría del software codifica a valores numéricos (proceso de Reclasificación). En el ámbito de los ráster, se considera a la variable localización representada mediante X e Y de la celda, y como variable temática Z el valor de dicho pixel sea continuo o discreto. "Fuente*: Análisis Espacial con Datos Ráster en ArcGIS Desktop 9.2.

- Definir el método de construcción del modelo, teniendo en cuenta que información va a ser representada y cual se descarta en función del método adoptado.
- Realizar un esquema concreto de almacenamiento y gestión de datos, con sus ventajas e inconvenientes.
- Traducir algoritmos a formas concretas compatibles con los datos elegidos.
- Tener en cuenta las limitaciones informáticas para gestionar la información en el formato elegido.

Espacio de almacenamiento de los mapas de desplazamiento: Los mapas de desplazamiento se codifican en conjuntos de bits de longitud determinados (la llamada profundidad de color) en los pixeles, los cuales se pueden almacenar en: 8bits (2^8) con 256 niveles no es capaces de capturar grandes desplazamientos sin introducir artefactos como "*stair stepping or banding"* debido al pequeña variedad de tonos de este formato, 16bits (2^{16}) tiene una amplia variedad de valores de almacenamiento, los datos extraídos se normalizan para que encajen con la profundidad de bits determinada y 32bits (2^{32} *"floatmaps"* llamados de punto flotante) tiene un espacio de almacenamiento que permite almacenar información evitando la pérdida de calidad.

En el campo de los videojuegos la información de dirección y desplazamiento se puede guardar en una parte del rango de los 32bits, por ejemplo 24 Bits dirección y 8 bits desplazamiento, en donde los tres de los canales definen la dirección del desplazamiento a un punto determinado y el cuarto canal contiene el desplazamiento. También es posible almacenar en esos 8 bits solo la información de X, Y del vector de desplazamiento, en donde el tercer vector puede ser restaurado con la ecuación $z^2=1-(x^2+y^2)$. Cada uno de los vectores restantes puede ser representado por un valor de 12bits, permitiendo una precisión reduciendo los tiempos computacionales. También existen otras combinaciones como 16bits dirección y 16bits de desplazamiento; 8bits desplazamiento y 24bit normal; 2 x 8bits desplazamiento y 16bits normal; 16 bits desplazamiento y 16bit normal (CORSO 2009).

Simulación de procesos con los Modelos Digitales: La naturaleza digital de los modelos descritos permiten la simulación dinámica, mediante la modelización de procesos a partir de algoritmos numéricos, como secuencias de operaciones que conducen a la solución de problemas específicos, los modelos generados se denominan modelos digitales derivados (FELICÍSIMO s.f.).

Los modelos derivados son susceptibles a revisión mediante el contraste o verificación del modelo derivado real, comparando una muestra del modelo derivado con medidas empíricas realizadas sobre terreno, permitiendo efectuar ajustes en el algoritmo.

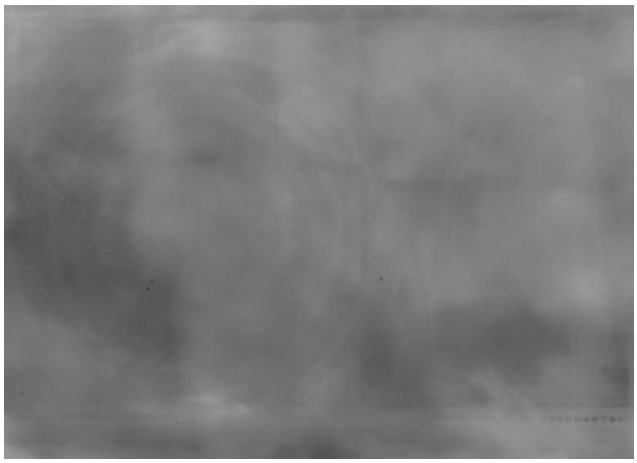
La modelización de procesos exige una selección de parámetros y de las relaciones relevantes para solucionar el problema, esta selección de variables y procesos y de su representación se denomina parametrización.

Visualización del relieve desde los modelos digitales: Los valores de altura pueden codificarse en escala de grises, donde el menor valor corresponde al negro y el mayor al blanco, estos valores permiten interpretar la información, pero no permiten la descripción de elementos menores del relieve. El problema básico de la representación del relieve de los modelos digitales están estrechamente relacionados con procesos de iluminación, sin ellos se dificulta la interpretaciones de la imagen.

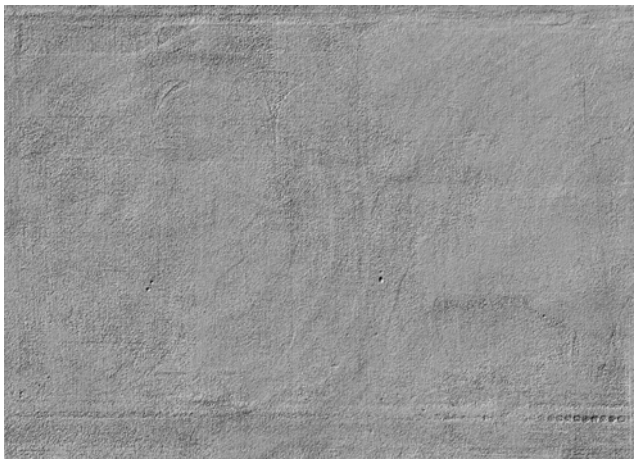
Aparte de las posibilidades del tratamiento numérico que permiten los modelos digitales, son necesarias representaciones sintéticas que permita la interpretación visual directa, cobrando mayor importancia cuando el volumen de datos es importante, haciendo más manejable la información.

Modelo de iluminación a partir de modelos digitales: Gracias a la información de elevación se puede simular la iluminación sobre la superficie. Un ejemplo de simular una iluminación con un modelo digital es el sombreado topográfico (Hillshade), que muestra el grado de iluminación en relación a la orientación (ángulo acimutal) y el ángulo de elevación (cenital), que por defecto suelen usarse 45o de Elevación Solar y 315 de Orientación, como se muestra en la Ilustración 103.

Ilustración 103: Iluminación Hillshade de los murales de Sant Miquel, resaltando relieves de las superficies

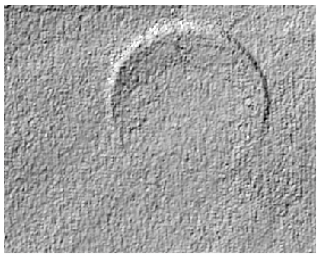


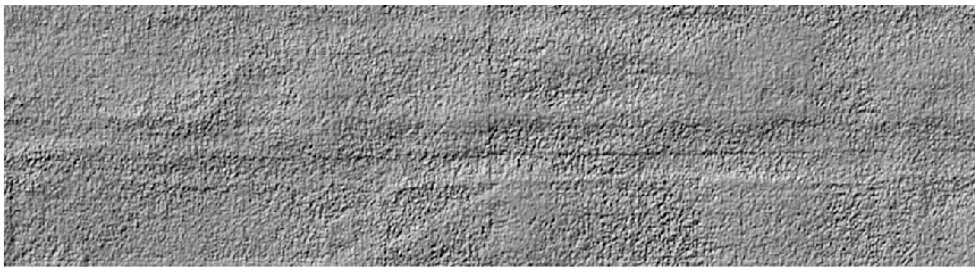
MDE de partida



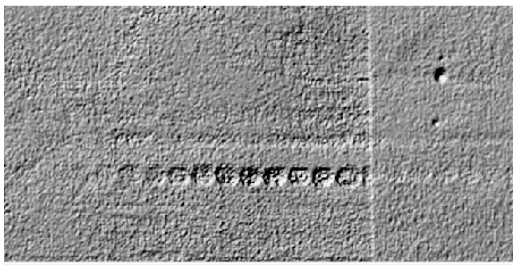
de una pintura

Hillshade de una de las pinturas





Relieve de una aureola de un santo. Hendiduras en line recta, como marcas o traza para las pinturas



Huecos en las pinturas y hendiduras de círculos en las pinturas. Trazas de compas, como marcas utilizadas en las pinturas.

Fuente: Propia

Para el cálculo de la iluminación se tienen en cuenta los siguientes factores:

- Fuente de luz directa y fuente de luz hemisférica para simular la luz difusa. En el ejemplo planteado se usa un ángulo de 315º y 45 de acimut.
- Punto de vista cenital, sobre el modelo con un ángulo de 90º.
- Reflectancia *lambertiana* o perfectamente difusora. EN donde el brillo aparente no depende del observador.

Elementos que componen un ráster: La matriz de datos contiene tres tipos de datos:

- Valores numéricos para variables cuantitativas.
- Identificadores numéricos para variables cualitativas, los valores corresponden a etiquetas que describen variables cualitativas.
- Identificadores numéricos únicos para cada entidad representada, en el caso que la capa ráster contenga entidades (puntos, líneas o polígonos). Las entidades se distinguen diferenciándose del fondo, al ser valores diferentes de cero. Se introduce el valor de nulo (Null) para las celdas del ráster que no son entidades, algunas veces se utiliza el cero, aunque es distinto decir un valor cero a un valor nulo.

Información geométrica de la matriz en relación al espacio:

- Número de columnas (n_c)
- Número de filas (n_f)
- Coordenadas de las esquinas de la capa (e,w,s,n)
- Resolución o tamaño de pixel en latitud (r_x) y en longitud (r_y)

4.5.4 Clasificación ráster

La clasificación ráster es un proceso muy extenso, hasta el punto de existir una disciplina para ello, la Teledetección[67], por ello en este punto solo queremos exponer en términos generales cuál es su tendencia, y realizar un ejemplo de ello con la información TLS, resaltando las limitantes y virtudes de dichos métodos.

La teledetección parte de acumular un conocimiento previo que permita diferenciar zonas de las imágenes ráster, la fase de recolección de dicho conocimiento se le conoce como "fase de entrenamiento", esta fase se puede realizar por:

- Método supervisado: Parte de algún tipo de experiencia previa del analista.
- Método no supervisado: Clasificación a partir de patrones comunes en los datos, sin añadir ningún conocimiento previo.

La siguiente es la "fase de asignación", en la que se atribuye valores a cada celda con una categoría previamente determinada. En este punto se debe definir una función de similitud, que permita verificar que cada celdilla que pertenezca a un determinado cluster es más parecida entre sí, que a los clusters

[67] *"La Teledetección (Remote Sensing en inglés) se puede definir como la técnica que permite obtener información a distancia de objetos sin que exista un contacto material, y que de manera general, están situados sobre la superficie terrestre. Para que esta observación sea posible es necesario que, aunque sin contacto material, exista algún tipo de interacción entre los objetos y el sensor. En este caso, la interacción va a ser un flujo de radiación que parte de los objetos y se dirige hacia el sensor. Este flujo puede ser, en cuanto a su origen, de tres tipos: radiación solar reflejada, radiación terrestre y radiación emitida por el sensor."* Fuente: (PINILLA 1996)

de otro agrupamiento, estas funciones pueden ser por ejemplo: clasificador de mínima distancia, clasificador isodata, clasificador paralepipédico, entre otros.

Para confirmar la clasificación se utilizan dos técnicas:

- Comparar la clasificación con otras fuentes. Siendo un método que se basa también en un muestreo, que puede estar desfasado, o no sea fiable.
- Realizar una comprobación en sitio, con la muestra de la celdilla clasificada. Prueba más fiable al realizarse de forma directa.

Matriz de confusión: Los resultados de estas muestras se cruzan con la información de la clasificación en una matriz cuadrada, siendo las columnas la propuesta del clasificador y las filas la ocupación real, verificando la pertinencia de dicha categoría, así la diagonal principal contendrá las celdillas bien clasificadas y aquellas que estén fuera indicaran el error de las asignaciones. *"La matriz de confusión es una modalidad de tabla de contingencia, a partir de la cual se podrá extraer información cuantitativa acerca del proceso de verificación. Así, tendremos medidas de fiabilidad total, riesgos de usuario y productor"* (GARCIA 2008).

Los errores se pueden definir como error de omisión cuando aun perteneciendo a una determinada categoría, la celdilla no fue asignada a ella, o error de comisión cuando la celdilla es asignada a una categoría perteneciendo a otra.

Un ejemplo de clasificación fruto de una investigación específica se puede ver en la web (MUHBA 2012), de los murales de *Sant Miquel*, en el Monastir de Pedralbes, que clasifican las pinturas entre pintadas al seco, pinturas al seco Atzurita (pigmento azul) y pinturas al seco transparencias. Se realizaron pruebas de clasificar basados en una imagen de intensidad TLS, ya que esta da cierto valor de reflectancia. El resultado se ve en la Ilustración 105, que aunque no da un resultado final, entre la clasificación entre pinturas al seco y al fresco, en comparación con la Ilustración 104, permite una base para el estudio de este tema concreto, como una primera clasificación, que se puede ir corrigiendo.

Ilustración 104: Captura de la página web Murals sota la lupa, Monestir Pedralbes

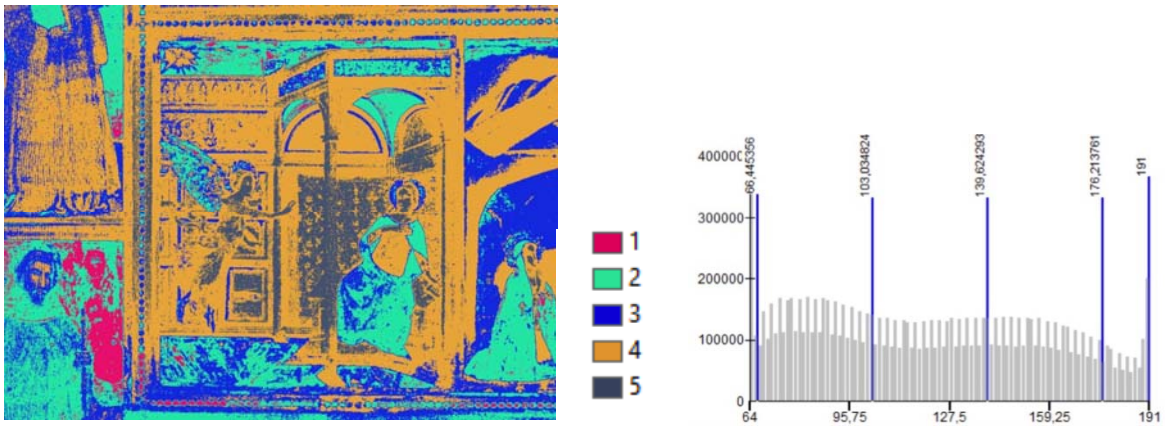
Fuente: (MUHBA 2012)

No se llegó a encontrar una clasificación definitiva de estas técnicas de pintura, considerando la información generada una base, sobre la cual un experto debe realizar una investigación en el lugar

patrimonial. Esto se debe a la complejidad de materiales del caso de estudio, tanto por su variedad, unos con pigmentos de óleo, huevo u otros, que dificultan encontrar categorías concretas, y por otro lado hay que tener en cuenta los más de 500 años que tienen estas pinturas, sobre las cuales han intervenido muchos procesos.

Aun así se entiende que las capas obtenidas son una base que reduce las técnicas manuales de selección de contornos entre zonas con características similares, que requieren una mayor investigación e interpretación en sitio de sus características, también entendemos que estas capas de información preliminares, permiten la obtención de nuevas capas de información a partir de otras previamente disponibles.

Ilustración 105: Clasificación de la intensidad, entre superficies más reflectantes 1,2,3 y las menos reflectantes 4 y 5



Fuente: Propia

Capítulo 5. CASOS DE ESTUDIO

5.1 Introducción

A continuación se desarrollan dos casos de estudio, que contemplan los procesos descritos a lo largo de la tesis, desde la toma de datos, los procesos de clasificación, el análisis de la nube de puntos, la extracción de datos y su síntesis en planos 2D - 2.5D, sin perder la relación con los modelos 3D, que permiten la definición de características concretas, de los edificios analizados.

El primer caso de estudio es el análisis de la hilatura del siglo XIX de Fabra i Coats y el segundo es el estudio de una fachada del claustro de la Catedral de la Seu Vella de Lérida.

Estos casos de estudio se complementan con una entrevista realizada a profesionales, de diferentes disciplinas, relacionadas con la conservación, prevención y divulgación de bienes patrimoniales arquitectónicos.

Las entrevistas desarrolladas parten de la necesidad de integrar los diferentes puntos de vista, que se cruzan en torno a la documentación patrimonial, entendiendo que cada profesión tiene consideraciones propias en el momento de desarrollar levantamientos arquitectónicos, pero que el hecho de trabajar partiendo de un levantamiento riguroso, puede permitir acercar estos puntos de vista, y aunque se generen documentaciones de diferente tipo, esta puede relacionarse al tener una base común.

Todo ello parte de la premisa de que la documentación patrimonial es una responsabilidad primordial de todos los implicados en los procesos de conservación, no solo como una obligación ética para la posteridad, sino también como fuente de beneficios inmediatos en términos de planificación de proyectos, comunicación interdisciplinar y evaluación de los resultados (LETELLIER, Recording, Documentation, and Information Management for the Conservation of Heritage Places, Guiding principles 2007). Todos los implicados en la conservación y entendimiento del lugar patrimonial, deben tener acceso a la información existente y a generar documentaciones, que deben ser preservadas y disponibles para otras personas.

Este proceso se ve limitado por la comunicación entre las diferentes disciplinas involucradas en el proceso de conservación del patrimonio, puesto que no hay estándares uniformes de registro, de documentación y de gestión de la información (J. L. LERMA 2008), por ello se plantea una metodología de segmentación y corregistro de la información TLS. Que permita sobreponer bases de datos y análisis posteriores de los bien patrimoniales, de tal forma que se pueda identificar patologías o modificaciones del edificio si se realizan estudios en diferentes fechas, sin ser una limitante la escala sobre la cual se trabaja la información.

Ello permitiría que un registro arquitectónico pueda ser profundizado con la documentación que permitiría la restauración del edificio, o el estudio estratigráfico de la fachada desde el punto de vista arqueológico, teniendo en cuenta que se considera el registro arquitectónico como instrumental, mientras que la documentación del material y las tipologías de degradado son procesos manuales-visuales “*naked eye*”.

En la actualidad los procesos manuales-visuales están siendo modificados por las nuevas tecnologías, nos permiten sobrepasar la variante geométrica e incluso llegar a manipular información científica sobre los materiales (pérdida o alteración material de un objeto en el tiempo (SIMON 2010). Ejemplo de ello son los trabajos desarrollados por (SITHOLE 2008) y (WILLIS 2010), en términos de detección de materiales de fachada, (ABELLAN 2010) en términos de cambio de material y desgaste del mismo, (LINDSTAEDT 2011) y(AL-NESHAWY 2009) en relación a patologías por delaminación o deformaciones de fachadas.

Justificación de los casos de estudio en relación a las metodologías propuestas en la tesis: En la introducción de cada caso de estudio se explica su importancia patrimonial y los objetivos que llevaron a su desarrollo, aun así cabe destacar el porqué de dichos ejemplos en relación a las metodologías propuestas.

Las Calderas de Fabra i Coats: es un ejemplo de análisis de deformaciones de fachada, de un edificio que ha sido modificado varias veces en el tiempo, dichas modificaciones han tenido un impacto directo en las fachadas, como perforaciones para introducir maquinarias, la aplicación en altura, entre otros, estos cambios son un ejemplo interesante cuando se busca medir las deformaciones que puede tener las fachadas, cobrando especial interés una vez realizado este estudio las presiones que ejerce las tolvas en su apoyo en la fachada, la cual tiene un impacto en puntos con grietas, las cuales se ha medido encontrando la deformación de las superficies. Estas características de fachada han permitido realizar un ejemplo excepcional de análisis de deformaciones, que ha permitido testar técnicas que permiten aislar el plano mayor que compone la fachada y con ello estudiar su deformación teniendo en otro mapa la información de detalle de la sillería, logrando diferentes niveles de aproximación, que permiten un mayor entendimiento de la fachada.

La fachada del claustro de la Catedral de la Seu Vella de Lérida: Existen dos motivaciones para la realización de este caso de estudio, dado el detalle de las fachadas en piedra, las cuales permiten una explotación de la información tanto en 3D como en 2D (2.5D). La primera motivación era encontrar patologías de las piedras, entendiendo que la superficie de las fachadas presentaba alteraciones volumétricas, que con técnicas de Fotogrametría eran difíciles de identificar y en la que el análisis de la superficie daba herramientas para encontrar puntos críticos de estas fachadas. La segunda motivación era de tipo arqueológico o histórico, al poder resaltar detalles de interés de las superficies, como base sobre la cual se pudiera conocer o profundizar los detalles de las piedras, en relación al proceso e instrumental utilizado.

A consecuencia de esta búsqueda, surgieron nuevas líneas de trabajo, ya que el detalle ampliado de la piedra, podría permitir un análisis estratigráfico de fachadas desde la arqueología, llegando a identificar los cambios en las superficies al relacionar informaciones en diferentes capas, ello daría pie a poder agrupar zonas con características comunes, a partir de un trabajo de definición de estas características, lo cual solo se puede llevar a cabo con la participación de arqueólogos especialistas en el tema. Aunque este proceso no se llevó a cabo en su totalidad, si se establecieron pautas para este tipo de levantamiento, siendo este caso de estudio una importante base para trabajos futuros, en cuanto a metodologías y pre definición de resultados que se esperarían de dichos trabajos.

Definición de los perfiles para la aplicación de las encuestas: Se realizó una búsqueda de las principales líneas que utilizan la documentación del patrimonio, como base para la conservación y

difusión del mismo. En esta búsqueda hemos destacado las siguientes disciplinas, contando con un especialista al cual se le realizará la encuesta:

- **Arquitectos especializados en patrimonio arquitectónico**. Antonio Almagro Gorbea[1], Arquitecto especializado en historia de la arquitectura Islámica y restauración.
- **Arqueólogos e historiadores.** Reinald Gonzàles[2] Doctor en historia del Arte, historiador y arqueólogo.
- **Restauradores.** Elena Urueña[3], especialista en conservación y restauración.
- Las profesiones que realizan un exhaustivo **análisis de los materiales.** Antonia Navarro Ezquerra[4], Geóloga en materiales de construcción.

1) Antonio Almagro Gorbea. Arquitecto especializado en historia de la arquitectura Islámica y restauración.
Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Escuela de Estudios Árabes
Profesor de Investigación
http://www.laac.es/index.php?option=com_content&task=view&id=37&Itemid=50

2) Reinald Gonzàles. Doctor en historia del Arte, historiador y arqueólogo.
Director de VERCLUS.
Docencia en diferentes cursos y Másters sobre documentación arquitectónica y arqueológica.
http://www.veclus.cat/La%20nostra%20gent/LA%20NOSTRA%20GENT.html

3) Elena Urueña. Especialista en conservación y restauración.
Su extensa experiencia en obra abarca desde trabajos de obras pictóricas – escultóricas, hasta proyectos a escala arquitectónica. Como pueden ser la consolidación de pinturas de La casa Milà (La Pedrera) o en la Alhambra, y a escala arquitectónica como con obras en el hospital de Sant Pau, entre muchas otras.

4) Antonia Navarro Ezquerra. Geóloga en materiales de construcción.
Doctora en Geológicas
Profesora Asociada del Departamento de Construcciones Arquitectónicas II

5) Ernest Redondo Dominguez
Doctor arquitecto, profesor titular de universidad.
Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica I.
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona.
Universidad Politécnica de Cataluña-BarcelonaTech

Metodología de las entrevistas: Las entrevistas parten de un material desarrollado previamente, a través de una presentación que tiende a ser gráfica, para facilitar la rápida comprensión del material desarrollado, el cual consta de una breve explicación de lo que es la tecnología de Escáner Láser Terrestre, y como se trabaja con la información recolectada en tres dimensiones. Posterior a ello se procede a comparar esta información en 3D con las bases de datos generadas en 2D y 2.5D, mediante dos ejemplos específicos, el primero una de las Calderas de Fabra i Coats y el segundo unas fachadas de la La Seu Vella de Lleida. Ver el anexo de la presentación para la encuesta y la transcripción completa de las encuestas en los anexos.

A partir de esta presentación se realizaron preguntas sobre el material expuesto, comenzando con el nivel de comprensión entre los formatos, preguntando las ***diferencies entre la información de levantamientos 2D y 3D de los casos expuestos.*** También se preguntó ***¿Cuál cree que es la forma más práctica para manipular esta información desde su campo de estudio?,*** con esta pregunta se buscó evaluar con que base trabajarían y si se entendía como se manipulan estas bases y que aportes puede ofrecer el trabajar en 2D, 2.5D y el 3D, entendiendo que se plantea desde el inicio que la información TLS como datos en un ráster permite una mayor accesibilidad a esta información, sin comprometer precisión y con la posibilidad de volver a retomar esta información en un modelo en tres dimensiones, gracias la información de profundidad.

Partiendo de este punto se quiso profundizar en aplicaciones directas de los levantamientos desarrollados, preguntado ***¿Qué aplicación desarrollaría basándose en los ejercicios expuestos?***, buscando una vinculación de lo desarrollado con casos de estudio referentes a sus disciplinas.

Paralelo a ello se consultó si estos levantamientos eran aplicables en sus disciplinas y con qué otras podrían ellos trabajar, teniendo como punto de partida los levantamientos y procesos expuestos. Al mismo tiempo se buscó también medir el nivel de interés en involucrar estas técnicas en las disciplinas que rodena sus ambientes de trabajo, la pregunta específica al respecto fue: ***¿En qué campos o disciplinas relacionadas al patrimonio sería útil las técnicas explicadas?***

Gracias a que la información 3D ejemplificada se puede administrar como capas de información y que en 2D (2.5) se pueden manejar la información como capas que se sobrepone, se preguntó qué ***¿Qué material complementario usaría con el material expuesto?***, entendiendo que existen estándares como fluorescencias, o infrarrojos, entre otros utilizados en restauración y en otras disciplinas se incluyen extensas referencias. Estas informaciones se tienen que tener en cuenta desde el inicio del levantamiento, ya que al permitir relacionarlas, se logra una mayor accesibilidad a la información y consigo a la comprensión del bien.

Relacionando todos estos puntos se preguntó ***Desde el punto de vista metodológico y partiendo de la base expuesta, ¿con que información comenzaría a trabajar?,*** buscando con ello saber cuál de las representaciones desarrolladas se debe tomar como punto de partida y con qué información continuar, al mismo tiempo ver la necesidad de constatar la información en 3D y como se procedería integrar estos levantamientos en trabajo de campo o con los equipos respectivos de cada encuestado.

Por último se preguntaron ***¿Qué limitantes encuentra en el uso de esta información?***, tratando de comprender que puntos no quedaron claros y cuales profundizar. Esta pregunta también busca ver porque se aplica o no se aplican estas nuevas tecnologías.

5.2 Caso de estudio 1. Herramientas para el análisis morfológico de *Fabra i Coats* en Barcelona

Con este caso de estudio se plantea una metodología para el análisis morfológico de fachadas patrimoniales, a partir de un levantamiento con la Tecnología de Escáner Láser Terrestre TLS, tanto desde un punto de vista tridimensional, como del desdoblamiento de las fachadas en 2D y 2.5D, manteniendo en todo momento el control de la información de partida, su transformación para ser explotada en diversos formatos, con objetivos específicos, a diferentes escalas, desde el nivel arquitectónico con deformaciones de fachadas y análisis de texturas, hasta la identificación del relieve de los materiales, como una herramienta que amplía la información, para ser interpretada por especialistas de diversas disciplinas, relacionadas a la conservación del bien patrimonial. El caso de estudio propuesto es un ejemplo destacado del patrimonio Industrial de Cataluña, las calderas de *Fafra i Coats*, las cuales fueron documentadas utilizando un escáner láser Faro Focus^{3D}.

5.2.1 Barcelona industrial, caso de estudio de Fabra I Coats

En el siglo XIX Catalunya fue un protagonista destacado en la Revolución Industrial, dejando su huella en la historia, cambiando una estructura de producción artesanal, a la organización de trabajo vinculado a la fábrica. Con un progreso productivo y urbanístico intenso y rápido, al punto que muchos edificios industriales dejaron de existir, otros prosiguen su abandono hasta nuevo uso o destrucción y otros han tenido la suerte de haber sido rehabilitados. Estos espacios forman parte de la identidad de Catalunya, teniendo en cuenta tanto la memoria colectiva, la urbana y la arquitectónica.

Ilustración 106: Levantamiento TLS, perspectiva nube de puntos Fabra i Coats

Fuente: Propia

Uno de los ejemplos más destacados de estos procesos de rehabilitación es el complejo industrial de *Fabra i Coats*, catalogado Patrimonio Arquitectónico de Barcelona con el nivel C (APARICIO 2011), siendo un edificio que reúne valores históricos, artísticos y estéticos, considerados relevantes en el sector urbano donde se emplaza.

"Parto de la información en 2D, su representación en 3D reduciría el tiempo de trabajo de campo."

Entrevista Antonia Navarro (pregunta 1)

Es una hilatura del siglo XIX, que forma parte del antiguo municipio de Sant Andreu del Palomar, construido entre los años 1890 y 1955. El ayuntamiento de Barcelona lo adquirió en el 2005, convirtiendo sus naves principales en un centro cultural de referencia, se concibe como el proyecto emblemático del programa "*Fàbriques de Creació"*. Un espacio concebido para enriquecer el barrio en el cual se localiza, enfocado a la creación, la práctica y la difusión artística multidisciplinar.

El levantamiento de este bien patrimonial se realizó con la Tecnología Escáner Láser Terrestre (TLS) Faro Focus^{3D}. Se centró en una de las torres de la nave central del complejo industrial, construida entre 1919-1929. Constituida por: las naves de calderas, la central eléctrica y de bombeo, estas últimas dos centrales se ubican en la planta baja de un edificio de cuatro plantas. El conjunto industrial posee una estructura de ladrillo visto, con pilares y jácenas de perfilaría laminada inglesa, como se ve en la Ilustración 106, render de nube de puntos.

5.2.2 Levantamiento con Escáner Láser Terrestre

Como paso previo al registro de la nube de puntos, se plantearon las limitantes técnicas en relación a la complejidad de levantamiento a realizar, teniendo en cuenta los elementos de menor tamaño que se pueden encontrar en edificios industriales, estableciendo con ello los ajustes y alcance del registro final, teniendo en cuenta la densidad de medidas necesarias para todos los elementos, la distancia óptima para la captura, teniendo en cuenta los ángulos de incidencia y de oclusión, considerando las características del equipo utilizado. La adquisición de datos de este caso de estudio se desarrolla en el capítulo 3.4, comparando los levantamientos del Riegl z420i y el Faro Focus^{3D}, en relación a la información base y al proceso de clasificación, como modelos científicos y de difusión.

El escáner utilizado se basa en la diferencia de fase, el Faro Focus^{3D} permite un rango de captura amplio 360º H * 305º V, con una precisión de 0.6 mm a 10 m, 0.95 mm a 25 m (con una longitud de Honda de 905 nm), con un error sistemático de ≤ ± 2 mm a 25 m, aparte de la información de intensidad reflejada del láser se capturan fotografías, con información de color RGB que se asignan a los puntos, mediante una cámara integrada de 70 mega pixeles. La resolución por posición de escaneo de Fabra i Coats fue de 1/8, con 4x de calidad, esta calidad hace referencia al número de comprobación es para reducir el error del levantamiento, obteniendo por posición en promedio 38 millones de medias, en total se realizaron 82 posiciones, obteniendo un modelo final de 1.300 millones de puntos.

> La principal limitante de la información TLS "es probablemente el tamaño, de los ficheros, o el exceso de información, que no los hacen gestionables de manera simple, ficheros de mucho tamaño, de muchos megas, con muchos pixeles, con mucha calidad, que un ordenador normal no puede gestionarlo. Un problema de exceso. Una estrategia es fragmentarlo en partes, que encajasen exactamente y poder hacer el análisis por partes."
>
> Entrevista Ernest Redondo Dominguez (pregunta *7)*

Destacamos en el proceso de optimización de base de datos la unión entre posiciones, al ser un reto, por la complejidad del edificio, la estrechez de algunos espacios, la poca visibilidad entre posiciones,

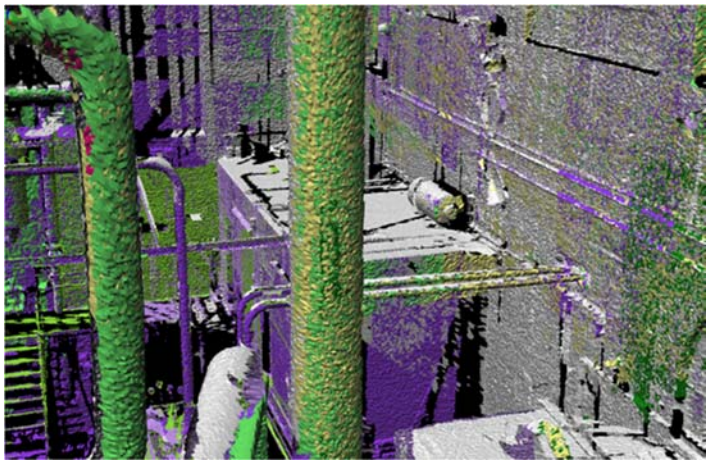
y la resolución con la que se requería el modelo final, en el cual era necesario ver hasta las cuerdas del techo, sin que estas se vieran duplicadas por errores de unión, en un número considerable de posiciones, en espacios interconectados. Para ello se utilizó el método de unión ICP descrito a continuación.

5.2.3 Método de unión de nubes de puntos ICP *Iterative Closest Point*

El registro ICP es posible independientemente de la naturaleza de los datos geométricos (puntos, curvas de diferentes grados, de las superficies). Se basa en minimizar la distancia entre dos nubes, punto a punto, por medio de iteraciones sucesivas. Las principales desventajas este proceso en su forma original, son en primer lugar que converge a un mínimo que puede ser falso, especialmente cuando hay una gran cantidad de ruido en los datos, y se necesita un gran número de iteraciones para la convergencia del modelo.

A pesar de que diversos estudios buscan encontrar valores iníciales para unir posiciones de forma automática, para acelerar el proceso de unión, se sigue utilizando una variante manual, al asignar puntos homólogos entre las nubes para su registro inicial, con estos puntos de partida, es posible calcular una transformación rígida inicial y luego comenzar las iteraciones. Sin embargo no siempre es posible encontrar puntos homólogos en las nubes de puntos, por lo cual se habla de “puntos de conexión”, si el algoritmo no los encuentra, tratará de sustituirlos por los puntos más cercanos, ejemplo de ello es la Ilustración 107.

Ilustración 107: Registro mediante el promedio de la distancia entre puntos de cada posición escaneada ICP



Fuente: Propia

5.2.5 Información geométrica, la forma de la fachada

Tanto los edificios patrimoniales como su contenido son objetos físicos susceptibles al deterioro, tanto de su variante constructiva y estructural, como por el hecho de estar expuestos en ambientes no controlados (SIMON 2010), los mecanismos de este deterioro son amplios y pueden resultar en la alteración y pérdida de material en el tiempo.

En procesos de restauración de estos bienes es indispensable delimitar zonas de las fachadas, para cuantificar su afectación y planificar los tiempos – coste de su conservación, igualmente en otros campos como en la arqueología se zonifican las fachadas históricas, este proceso se llama estratigrafía de fachadas, destacando la doble condición diacrónica (histórica) y sincrónica (arquitectónica) de los materiales y el edifico histórico (GONZÁLEZ-MORO 2011).

La cuantificación de este deterioro se puede llevar a cabo a partir de la información TLS, entendiendo que esta información es una herramienta, que permite a profesionales tomar decisiones, tanto de elementos específicos, como del conjunto del edificio, ejemplo de ello fue la intervención sobre la cercha de la cubierta de Fabra i Coats, la cual fue estudiada desde los planos generados a partir de la nube de puntos.

Estos procesos en la actualidad se llevan a cabo en su mayoría de forma visual, en algunos casos mediante orto imágenes. Consideramos que la información geométrica de la superficie de los materiales permitiría profundizar y añadir rigor a estos procesos, en los cuales la relación mortero-ladrillo es esencial, ya que estos materiales secos y húmedos permiten el estudio del deterioro o valor añadido que tienen fachadas de importancia patrimonial.

Estas intervenciones pueden realizarse a diferentes escalas, y con diferentes enfoques, a continuación profundizaremos en la parte morfológica de la fachada y del material que la conforma.

- **Deformación de la fachada**

Las fachadas analizadas se pueden considerar planas, aun así estas superficies planas presentan deformaciones, en el caso de la fachada principal producida tanta por la presión que aplican las tolvas de carbón, como por la acción del suelo sobre el edificio.

> ***"Como siempre partimos en dos dimensiones, pues la foto de color, con carta de color.*** *No veo mucha cosa en la nube de puntos en tres dimensiones, en cambio en la imagen ortogonal si, necesitaría el color con el relieve, es más importante para mí el relieve, pero debe ir acompañado con el color y la imagen de contornos, para poder saber que esta adelante y atrás. La información es mejor de forma individual, las imágenes por separado, porque al combinarlas hace que imagine cosas, que por separado no las veo, que la operación entre imágenes las haga cada usuario, pero que se puedan hacer."*
>
> *Entrevista Antonia Navarro (pregunta 6)*

Para cuantificar esta deformación analizamos la fachada en relación a un plano en 3D y la verticalidad del modelo, permitiéndonos visualizar de forma directa su afectación, pero impidiendo trabajar sobre dicho resultado, ya que el modelo 3D es muy complejo, y no permite superponer sobre estas capas de información. Por ello desdoblamos las caras del modelo 3D, y comenzamos a trabajar su información como imágenes de profundidad 2.5D georreferenciadas, en las cuales el valor de altura se almacena en el valor de cada pixel.

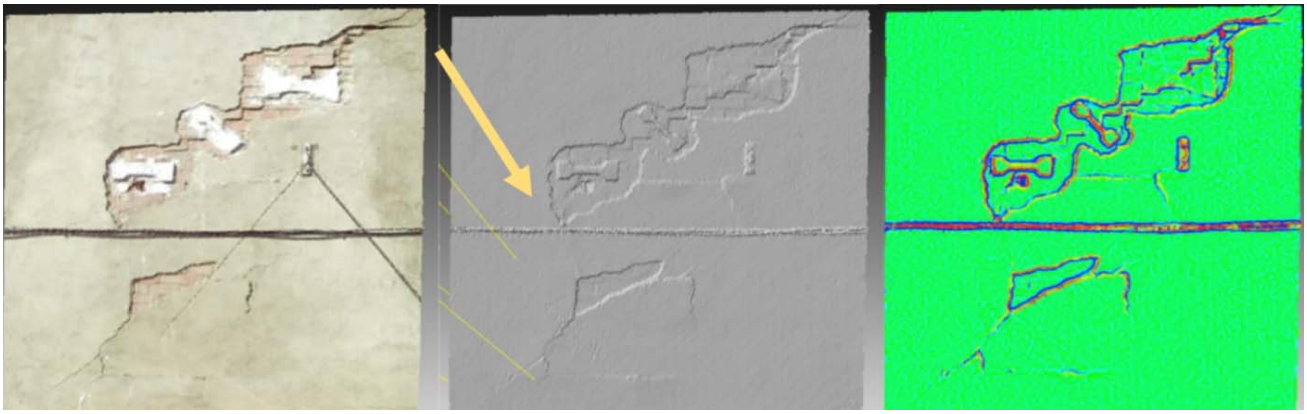
- **Detalle geométrico de los materiales de fachada**

A continuación se plantea una metodología para resaltar las juntas de mortero de la fachada en relación al ladrillo, diferenciando resultados tanto en tres dimensiones, como en la superficie de fachada desdoblada.

> ***"****El estudio de un edificio acaba plasmándose en informaciones gráficas, donde se superpone capas, diversas informaciones, que a su vez deberán ser interpretadas, este tipo de información se puede complementar con* ***imágenes de termografía, u otras informaciones obtenidas manualmente, el análisis de paramentos, análisis arqueológico, para tratar de ver el proceso constructivo, o el proceso de alteración, entendido como un proceso histórico."***
>
> *Entrevista Antonio Almagro Gorbea (pregunta 5)*

Partimos del análisis de la nube de puntos en tres dimensiones, destacando la capacidad de un rápido análisis de la superficie, como se ve en la Ilustración 118, que corresponde a un segmento de la fachada izquierda de las calderas de Fabra i Coats, sobre la cual hay una fisura con grapas. Esta fachada ha sido alterada varias veces, ha crecido en altura al expandirse las calderas de carbón a gasoil, y se hizo un hueco para pasar a través de esta fachada una caldera de eléctrica, después de una intervención se destapo la grieta y se grapo.

Ilustración 108: Segmento de fachada lateral en 3D. Izquierda modelo 3D texturizado, centro iluminación sobre el modelo y derecha análisis por curvatura RIMLS *Robust Implicut MLS*



Fuente: Propia

Sobre esta nube se aplicaron dos procesos, uno de iluminación, y un análisis de curvatura, *RIMLS Robust Implicut MLS*, que permite ver qué puntos la superficie tiene un cambio por curvatura, en un rango de 5cm.

Estos análisis se pueden almacenar como un valor en la nube de puntos, pero al ser en tres dimensiones difícilmente se pueden comparar con otros datos, impidiendo superponer los análisis aplicados como capas de información. Por ello se procedió a trasladar este proceso a imágenes ráster, que permitieran no solo ampliar la información geométrica, sino ser una herramienta que permite superponer capas de información en términos de fachada.

El proceso de desdoblamiento parte de la detección del plano principal de la fachada, sobre el cual se rotará y trasladará las caras de la fachada, el plano principal se entiende como el que mejor describe la fachada dentro de un rango, para su extracción se utiliza el método iterativo RANSAC, para la detección del plano más grande que se encuentre en la nube dentro de un rango de 10cm.

Este plano se analiza de forma independiente, para obtener una mejor interpretación de las deformaciones que presenta la fachada.

- **Detección del plano mayor que define la fachada, clasificación semiautomática RANSAC**

El proceso de clasificación se describe en los capítulos 3.3.2 Clasificación RANSAC de planos múltiples, con la detección del plano mayor de fachada, detección de planos RANSAC en MATLAB y el capítulo 3.4 Clasificación arquitectónica, caso de estudio del patrimonio industrial de las Calderas de Fabra i Coats, en cuanto a los procesos de clasificación manuales, como base para estudios rigurosos y su difusión.

La metodología planteada se centra en una nueva forma de reconstruir la información TLS, que parte de la identificación de propiedades físicas de la superficie que compone la fachada, en primer lugar mediante la extracción del plano que define la mayor superficie de la fachada.

Este proceso se logra mediante el método iterativo *RANdom SAmple Consensus* (RANSAC) propuesto por (FISCHLER 1981): es un método iterativo para estimar parámetros de un modelo matemático a partir de un conjunto de datos observados.

Proviene del campo de visión por computador y se utiliza principalmente en la Fotogrametría, para encontrar los puntos correspondientes de un par de imágenes, en el registro de nubes de puntos (Método DARCES) (CHEN, HUNG y CHENG, RANSAC-based DARCES: A New Apágroch to fast Automatic Registration of Partially Overlapáging Gande Image 1999). Se utiliza también como algoritmo de segmentación geométrica, debido a su capacidad para reconocer automáticamente las formas a través de los datos (planos, cilindros, esferas y toros), a pesar del ruido de las mismas.

Las formas resultantes son probadas contra los puntos de los datos para determinar cuántos de los puntos se aproximan a la forma primitiva. A partir de la extracción de estos datos, se procede a calcular la superficie, en busca de encontrar la geometría que define la fachada. Para lograr el promedio se utilizaron diferentes técnicas, en los campos de procesamiento de imágenes y de construcción de mallas, concluyendo que los procesos de mallado permiten un mayor control del promedio de las superficies, con procesos de reducción de ruido en mallas que no modifican los límites de la los datos, y permiten análisis estadísticos en tiempo real.

5.2.6 Deformación de la fachada y detalle de los materiales

El edificio de las Calderas de Fabra i Coats presenta gritas en sus fachadas, principalmente debido a los cambios que ha recibido el edificio, se ha levantado todo el techo y prologando las fachadas, se han abierto huecos considerables en su fachada lateral izquierda, para pasar una caldera, se han añadido tolvas de carbón ancladas a la fachada principal, etc.

> ***"****En cualquiera que pueda completar la información de las características de la obra de arte, tanto de manera estructural, superficial, constructiva ó estilística. Es importante recalcar que la información conseguida con este escáner puede ser utilizada y aplicada por los diferentes tipos de disciplinas profesionales.* ***Cada profesional extraerá un tipo de información de la***

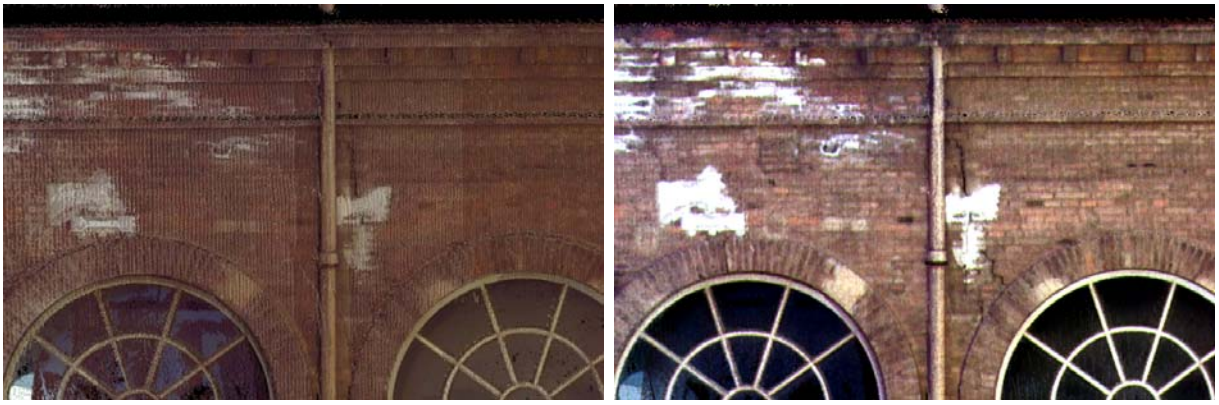
misma, según sus conocimientos y según la finalidad que quiera darle a esta información. *Uniendo los conocimientos de cada uno (arquitecto, geólogo, arqueólogo, restaurador, etc.), se podrá completar la información y el significado de cada deterioro que deba ser restaurado."*

Entrevista Elena Urueña (pregunta 3)

El levantamiento de escáner láser Terrestre, nos permitirá identificar futuros cambios de la superficie, permitiendo identificar si hay variaciones dimensionales y movimientos. También permite profundizar en el conocimiento de las fuerzas que actúan en la fachada, mediante el estudio de las deformaciones de la misma.

En el caso de la fachada principal se ve ha logrado visualizar la deformación, la cual se puede entender como un esfuerzo perpendicular al cerramiento, lineal y en vertical, generado por el anclaje de las tolvas (repartían el carbón a las calderas), produciendo un cortante muy definido, las tolvas generan un empuje perpendicular a la cara interior de la fachada, con una sujeción puntual, produciendo un alabeo, que en función del cerramiento produce un esfuerzo de tracción de la cara principal de fachada.

Ilustración 109: A Información de color sin optimizar con el procesamiento de imágenes, B Color optimizado utilizando la información de intensidad. C vista en conjunto de las fachadas estudiadas



A B

C

Fuente: Propia

"Una buena orto fotografía frontal, bien iluminada con contraste, con esa información yo ya puedo hacer la primera interpretación y análisis de eso datos, dos medidas o tres medidas, precisas, tomadas con un instrumento convencional, el teodolito no hay que quitarlo."

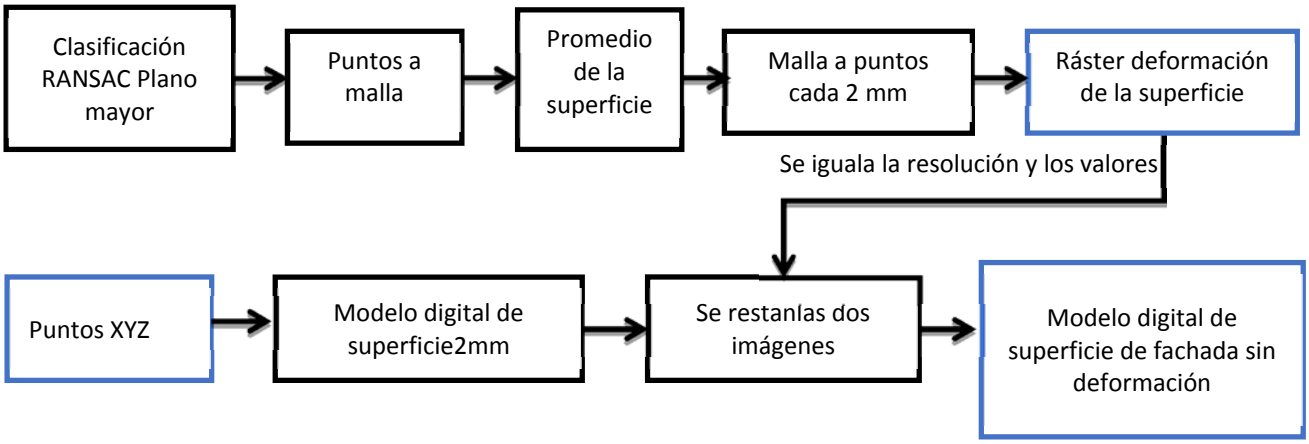
Entrevista Ernest Redondo Dominguez (pregunta *6)*

Para cuantificar la deformación de la fachada se aisló el plano mayor de fachada, con la siguiente metodología:

Partimos de la información clasificada de la fachada en el proceso RANSAC, para aislar el plano que define su pandeo o deformación, este plano se promedia quitando todo elemento menor de a los 3 mm que impida leer la tendencia de las superficies, como se muestra en la metodología de la Ilustración 110.

La metodología planteada pasa de la nube de puntos a mallas y luego a imágenes, ya que se considera las mallas como un paso intermedio oportuno para no modificar los límites del plano, aun así este proceso se puede llevar a cabo con la conversión directa de puntos a ráster, teniendo en cuenta el no modificar o expandir los bordes del plano en relación al tamaño del pixel. En la metodología planteada se filtró la malla, promediando los detalles menores a los tres centímetros, comparando el resultado final con la nube de puntos, evitando sobrepasar una diferencia por desviación estándar de tres centímetros.

Ilustración 110: Metodología para el análisis geométrico de una fachada considerada plana



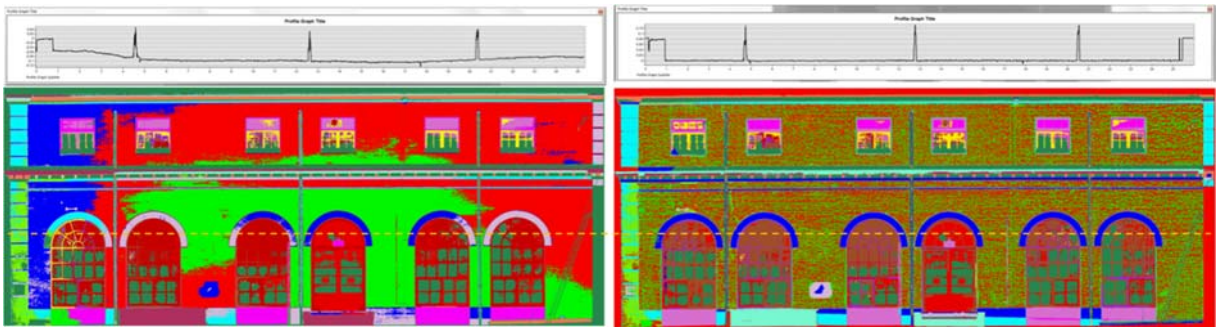
Fuente: Propia

Esta malla se subdivide a cada dos centímetros, generando una nube de puntos que se convertirá en un modelo digital de la superficie de la fachada, este modelo digital de superficie es un ráster en X, Y, que almacena en cada pixel un valor de altura, en este caso la altura es en si el relieve que tiene la fachada. Como el ráster es del plano mayor de fachada promediada, se representa como una imagen que describe la deformación de la fachada.

Esta imagen métrica de fachada se resta a la imagen ráster generada de forma directa de la nube de puntos TLS, como resultante se obtiene una imagen que resalta los detalles inferiores a tres centímetros en la fachada, en el caso de una fachada de ladrillo visto se ven las juntas de los ladrillos, las fisuras y elementos como grapas.

En la Ilustración 111 se ve la diferencia entre la imagen ráster tal cual viene del TLS y la que se le ha restado el plano mayor de fachada promediado, son dos imágenes clasificadas en función al valor de altura en el modelo digital de superficie. En la parte superior de las dos imágenes vemos una sección longitudinal, que muestra cómo se eliminó la curvatura de la superficie del plano mayor.

Ilustración 111: Clasificación por alturas del modelo digital de superficie proveniente del TLS y la clasificación del modelo digital de superficie sin la deformación de la fachada

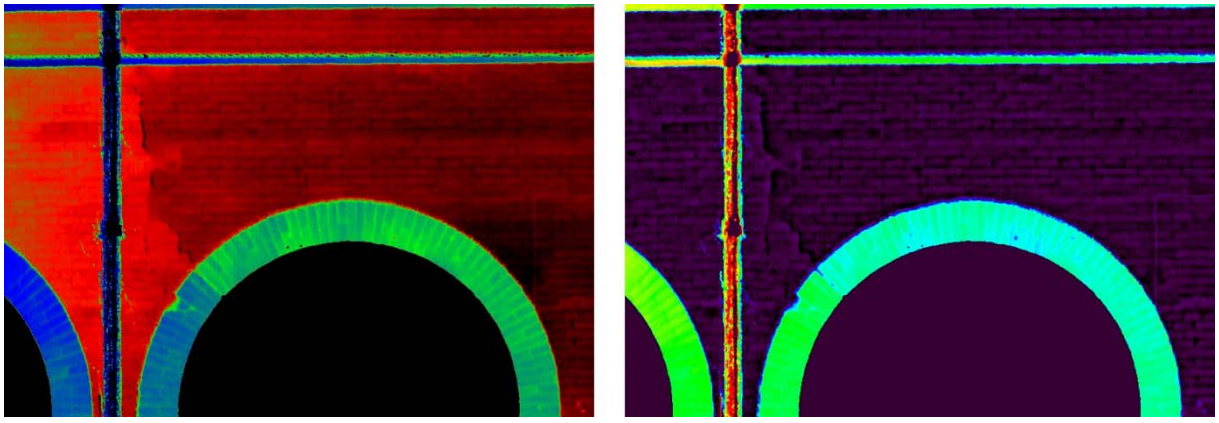


(Unsupervised 6 ROI) (Unsupervised 6 ROI)

Fuente: Propia

En la Ilustración 112 se repite esta comparación, destacando como la imagen sin pandeo de la superficie permite ampliar el detalle de fisuras de la fachada, eliminando la deformación que impide ver el valor de profundidad como una información útil para cuantificar una patología concreta.

Ilustración 112: Modelo digital de superficie generado a partir de la nube de puntos TLS y modelo digital de superficie sin la deformación de la fachada



Fuente: Propia

Esta información base requiere una lectura especializada, la comprobación en sitio y estudios complementarios, dada la complejidad de estudios que se pueden realizar de una fachada patrimonial, que involucran grados de conocimiento e interpretación de diferentes disciplinas.

Extracto de la entrevista con la restauradora Elena Urueña: La aplicación de las técnicas desarrolladas tiene diferentes aplicaciones, en relación a la obra, podemos destacar:

- ***"Delimitar todos los daños,** su localización espacial y el porcentaje de los mismos según su ubicación, cuáles son los más importantes y cuáles son los que pueden **evolucionar y aumentar poniendo en peligro la obra.***
- *Obtener información acerca de los deterioros provocados por los agentes externos a la obra (factores climáticos o alteraciones provocadas por el hombre, resultado de cambios, transformaciones y manipulaciones) o por los agentes intrínsecos a la obra, derivados de las características físico-químicas de los materiales que lo componen.*
- *Realización de **presupuestos detallados a partir de la información recopilada, con el porcentaje y cantidad de cada procedimiento a ejecutar,** ya que la información obtenida es lo más detallada y fidedigna posible.*
- *Realización de una **memoria explicativa con el estado de conservación** de la obra, según las conclusiones a las que se haya llegado por el estudio pormenorizado de cada daño.*
- *Con el estudio de los tipos de deterioro se puede **delimitar y priorizar la urgencia de las actuaciones a realizar** (no es lo mismo un daño que afecta a la estructura del edificio que uno que sólo afecta a la superficie del mismo).*
- *Según el tipo de tratamiento aplicado a cada imagen (color, volumetría y líneas) se podrían ver los diferentes materiales que integran el objeto a restaurar"*

Entrevista Elena Urueña (pregunta 2)

5.2.7 Límites de los elementos que definen la fachada

Desde el punto de vista geométrico, la identificación de las aristas tiene un interés creciente, como información de soporte para la definición de elementos arquitectónicos. Entendiendo que la expresión gráfica en la arquitectura *"no debe entenderse como una simple actividad técnica o una destreza mecánica; sino como una tarea de análisis y síntesis, que requiere iniciativa personal y está llena de intenciones"* (GÁMIZ Gordo 2003).

En este proceso la tecnología juega un papel cada vez más importante y aunque tenga una variante técnica importante requiere a su vez una síntesis con objetivos claros, siendo importante la incorporación de términos de estandarización, que permitan un mayor grado de entendimiento entre disciplinas.

Partiendo de esta premisa, se busca optimizar la información TLS para llegar a describir la fachada con líneas que defina sus aristas y modificando el valor de línea de estas en función a la capa que las identifica, sin llegar a pretender imitar un plano arquitectónico, sino como una base para llegar a un mayor grado de detalle planímetro en fachadas.

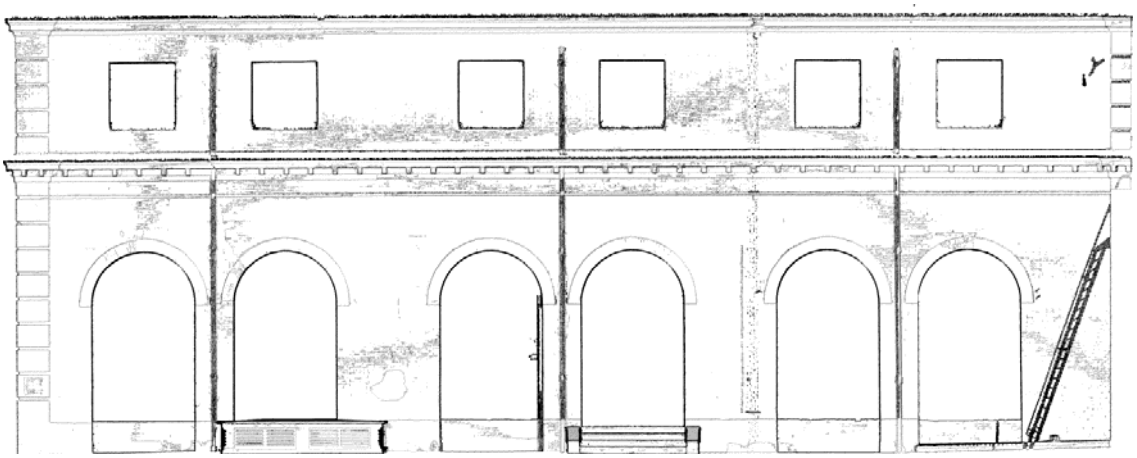
> ***"En todos los proyectos en los que he trabajado hubiera sido interesando disponer de esta información.** Para mi hay un pequeño matiz, una cosa es mi aproximación métrica a las cosas, para lo que **yo requiero es un 2D**. Pero ahora por ejemplo estamos haciendo una cosa en Ripoll de unas tumbas, las estoy dibujando y haciendo el 3D a línea. Es decir, **la carga de fidelidad, eso es importante, y yo creo que aquí hay mucho potencial."***
>
> *Entrevista Reinald Gonzàles (pregunta 2)*

Partimos del análisis de textura basada en una matriz *Co-occurrence*, específicamente el proceso *Second moment*, identificando límites de los elementos en relación a la profundidad, teniendo como base el tamaño del pixel de medio centímetro y la relación de pixel vecinos 3x3 pixeles.

Este proceso se aplicó tanto en el modelo digital de superficie de la información TLS sin filtros, como en el modelo digital de superficies sin pandeo descrito en el apartado 5.2.6. En el primer proceso Ilustración 113 se ve la afectación del pandeo de la superficie, la cual coincide con diferentes puntos de fisura de la superficie, teniendo en cuenta que la parte superior de la fachada en la que se denota más este pandeo no es una ampliación de la fachada, como se explicó anteriormente, debido a la necesidad de ampliar las caladeras de carbón a gasoil.

La Ilustración 114 que corresponde al análisis de textura Second Moment del modelo digital de superficie sin deformación, no tiene la línea de quiebre de la deformación de la fachada, permitiendo una lectura clara de los elementos que la componen.

Ilustración 113: Análisis de textura Second Moment de modelo digital de superficie a partir de la información TLS, basada en una matriz Co-ocurrence



Fuente: Propia

Ilustración 114: Análisis de textura Second Moment de modelo digital de superficie sin deformación, basada en una matriz Co-ocurrence

Fuente: Propia

En ambos casos los cambios más drásticos de la superficie en relación a la profundidad tienen un valor de línea mayor, existiendo un salto de información entre la información y el “no data”, generando errores fácilmente identificables visualmente, por ejemplo en la zona derecha, producida por la oclusión de una escalera. Este error se puede reducir con una máscara que contenga el “no data”, en la Ilustración 114 este error se minimiza por el promedio de la superficie del plano mayor.

- **Límites de los materiales de fachada**

La identificación de materiales de fachadas es una tarea compleja. *“Hay materiales de gran importancia arquitectónica que arqueológicamente apenas tienen relevancia. Hay materiales de una importancia histórica fundamental que arquitectónicamente pueden ser deleznables”* (GONZÁLEZ-MORO 2011). Se utiliza el término unidad estratigráfica arquitectónica, para estudiar zonas de las fachadas a partir del material, se puede definir la unidad estratigráfica como una zona homogénea, que permite una lectura, tanto de construcción, demolición o transformación del bien patrimonial. Las unidades estratigráficas se distinguen entre ellas por sus materiales y técnicas constructivas, por su color, composición, acabado, labra superficial, etc. (C. V. MILETO 2011)

A continuación se propone una metodología para destacar parámetros geométricos de la textura del material en la fachada, entendiendo que para su adecuada interpretación hay que hacer un estudio complementario *in situ*.

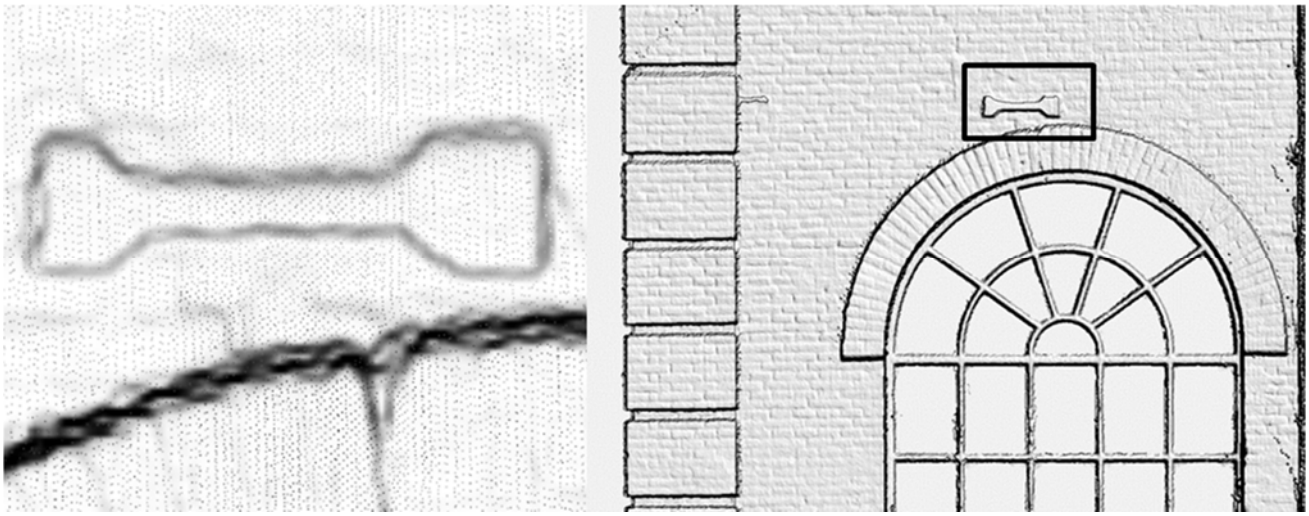
- **Análisis de curvatura del material de fachada.**

Los análisis aplicados sobre el modelo digital de superficie provienen de técnicas usadas en Modelos Digitales de Terreno DTM, entre estos análisis considerados topográficos, se encuentra el proceso *Shader Relief,* Ilustración 12, que mediante la simulación de un acimut y ángulo de una fuente de luz, permite recrear una iluminación sobre el modelo digital. Con ello se consigue visualizar el acabado de la superficie, teniendo en cuenta la relación de los pixeles vecinos, que en este caso es de 2 pixeles, buscando la visualización de las aristas más pequeñas, teniendo en cuenta que el valor de cada pixel del ráster es de medio centímetro.

Esta información se considera necesaria para delimitar elementos de pequeña escala. A la izquierda de la Ilustración 115 hay dos tipos de información superpuesta (visualizadas desde AutoCad y con una extensión de pointools para nubes de puntos), la imagen Shades Relif y la nube puntos, en esta se puede ver que la información de puntos es ilegible haciendo zoom sobre la zona de interés, mientras que la imagen ráster si permite esta aproximación. La misma situación se repite cuando se genera la imagen directamente en visualizadores de nubes de puntos, ya que para su correcta visualización tienen que superponerse la información de los puntos, la cual no es homogénea, afectando la escala y el detalle al que puede llegar la información TLS.

La imagen generada a partir de análisis de la topografía de la superficie, permite promediar el límite entre elementos complejos, como por ejemplo bordes en pendiente, simplificando dicha información en imágenes que permiten ver cambios en la superficie. Cabe destacar que esta información requiere una base que minimice el ruido de puntos fuera del promedio de las superficies, ya que este ruido se ve aumentado en análisis, se recomienda la utilización de filtros en las imágenes de profundidad, como los filtros de media, que eliminen pixeles aislados fuera del promedio de la superficie.

Ilustración 115: Filtro Shader Relief. Izquierda nube de puntos e imagen Shader Relief en detalle. Derecha imagen Shader Relief



Fuente: Propia

> ***"Tendría una aplicación directa"*** (las técnicas expuestas). ***"****Con las imágenes del ejemplo que has dado de Fabra i Coats, soy capaz de darte formas de alteración y proponer causas que las han podido generar, con el detalle que me das, dándome los cambios en las superficies,* ***se puede ver el relieve, la homogeneidad****,* ***las distancias entre el sillar, el grosor del mortero. Tener informaciones tan diversas me pueden ayudar a interpretar.*** *Yo cartografió en dos dimensiones, me das material para manejar diferentes puntos de información y yo luego le puedo añadir una foto de color. Estas acelerando el mapeo, yo para generar una información, me lo estas presentando en el laboratorio sin tener que desplazarme."*
>
> *Entrevista Antonia Navarro (pregunta 2)*

5.2.8 Corregistrar, levantamientos paralelos

La información generada tiene fidelidad con respecto a la realidad, siendo las limitantes de precisión las del instrumento usado y la metodología aplicada, por ello se plantea que la información TLS como imágenes ráster son la base para futuros levantamientos con otras tecnologías, análisis y desarrollos específicos, teniendo en cuenta la rápida evolución de la tecnología.

> ***"****Sería necesario el manejo de diferentes programas informáticos para poder volcar y añadir la información obtenida por el Restaurador para el estudio de la misma."*
>
> *Entrevista Elena Urueña (pregunta 5)*

Las nuevas tecnologías nos permiten profundizar aspectos geométricos de las superficies, manipular información de las nubes de puntos de forma científica, en busca de características de los materiales y su textura, abriendo puertas en campos de investigación, que buscan no solo la conservación del edificio, con los elementos que lo componen, sino la documentación de su estado actual con su respectiva evolución y la comunicación en ámbitos no técnicos de aspectos fundamentales que definen la obra arquitectónica.

Esta capacidad de análisis de la información mediante el registro tridimensional, con grados de detalle menores al milímetro, se ha explorado en diversas obras de importancia internacional, utilizando como herramienta de registro activo la tecnología de Escáner Láser Terrestre. Nos referimos a obras, ya que la exploración de detalles de materiales se ha centrado en la pintura y la escultura, al existir obras de este tipo trascendentales para el patrimonio de la humanidad, como los casos estudiados en el estado del arte.

La metodología propuesta busca trasladar estos análisis del material a los edificios patrimoniales, no solo como el registro del estado actual de las fachadas o como detalles aislados de zonas del edificio, sino como un intento preliminar de generar bases de datos que se puedan cruzar, para obtener nuevos esquemas de conocimiento.

> ***"Todo lo que tenga con luz podéis utilizar como canales, mirando la reflectancia podéis sacar temperaturas de materiales, pueden estar asociados a humedades****…. En el hospital de San Pau en uno de los pabellones todas las paredes están recubiertas de baldosa cerámica, y se quería saber cómo estaba adherido sin tenerlas que sacar, es decir con métodos indirectos, lo probamos con la cámara de termo visión, enviábamos un calor, lo apagábamos esperábamos la imagen, según lo que tuviera detrás enfriaba diferente, decía las que estaba enganchadas a toques, o las que estaban enganchadas al step, más hueco o menos hueco, podrías calcular en que zonas realizar la inyección."*
>
> *Entrevista Antonia Navarro (pregunta 5)*

5.2.9 Conclusiones

La información TLS permite el análisis geométrico de fachadas y de los materiales que la componen, este análisis se puede llevar hacer tanto en 3D como en 2,5D y 2D, teniendo como ventaja que los análisis en dos dimensiones se pueden sobreponer, complementando la información RGB y la intensidad con la información geométrica y análisis de la fachada.

La clasificación de la nube de puntos en 3D permite una mayor difusión y comprensión del bien, igualmente la clasificación de la información en dos dimensiones permite descomponer en capas elementos específicos del edificio, sin descartar la relación con otras informaciones, permitiendo contrastar y ampliar la información.

Igualmente el filtrado de zonas clasificadas permite nuevas aproximaciones al bien, como se demostró al promediar el plano mayor, destacando características del material y del pandeo de la superficie, reduciendo los procesos manuales - visuales *(naked eye)*, generando bases de datos estándares, teniendo como valor añadido el poder comparar estos análisis en distintos levantamientos del mismo edificio, en distintas fechas y estados de conservación.

Se entiende que este caso de estudió puede tener continuidad, en futuros trabajos de investigación, desde diferentes disciplinas, en las cuales se debe tener en cuenta:

Profundizar en las unidades estratigráficas de la arquitectura patrimonial, de forma objetiva -critica subjetiva, con una lectura crítica de valores históricos y artísticos de los elementos estudiados.

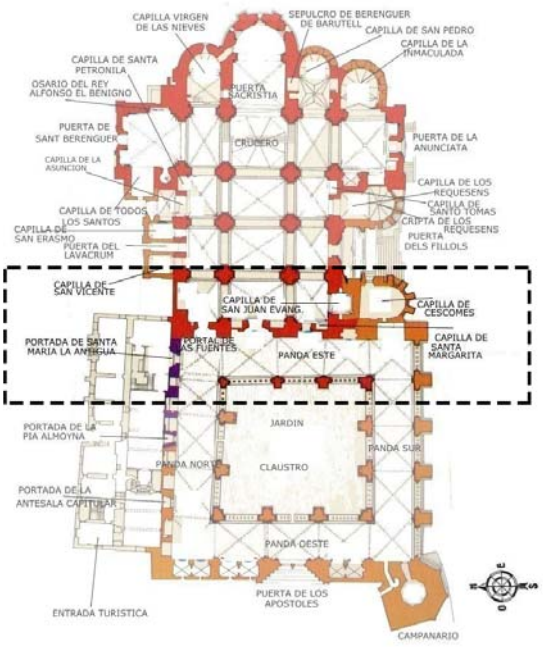
Desde el punto de vista técnico, comparar características técnicas del mismo procedimiento con otros casos de estudio, en relación a: densidad de datos/distancia, ángulo de incidencia, características del equipo, condiciones de iluminación, comparar TLS (ajustes y rendimiento necesario), precisión/exactitud, rendimiento alcanzado. A partir de ello identificar la fiabilidad de los resultados y los limitantes del método propuesto en relación a los casos propuestos, concretando las tipologías de análisis.

5.3 Caso de estudio 2: Análisis de la geometría en fachadas con detalles en piedra. La Catedral Vieja de Lérida (La Seu Vella).

Catedral de la Seu Vella de Lérida. Se ubica en el cerro conocido como Turó de Lleida que domina la ciudad y la *comarca del Segrià*. De estilo tardo románico, o de transición, posee las formas románicas y la monumentalidad del gótico, en otras palabas, aunque es de estilo románico, sus bóvedas son de crucería ojival góticas.

El levantamiento con la tecnología de escáner Láser Terrestre se realizó en tres puntos de la Catedral, en una zona de muralla en el perímetro de la edificación, en la puerta de los Apóstoles, y sobre una galería del claustro. El caso de estudio propuesto se enfoca principalmente en la galería del claustro, como se indica en la Ilustración 116, que a su vez es un mirador a la ciudad de Lérida, la cual se realizó entre los siglos XIII y XIV.

Ilustración 116: Planta de La Catedral Vieja de Lérida, zona del caso de estudio



Fuente: Propia

"Los muros son un claro ejemplo del paso del románico al gótico y en muchos elementos se evidencia la evolución de una época a la otra, destacando, por ejemplo, la obra escultórica muy ejemplar de la creación en esta etapa a nivel europeo. El templo, que gozó de su máximo esplendor hasta el siglo XV, sufrió el declive y el desgaste de las diversas contiendas militares. Durante la Guerra de Els Segadors (1640) al conjunto se le daría uso de hospital y de almacén de armas. Más tarde, en la Guerra de Sucesión, la iglesia se cerró al culto por orden de Felipe V y poco después pasaría a ser un cuartel militar. Con la guerra de la Independencia, en 1810, llegaron nuevas pérdidas y mutilaciones y, pese a que fue declarada monumento histórico en 1918, la catedral se convirtió en un campo de concentración durante la Guerra Civil y en un cuartel franquista hasta el año 1948."

La vanguardia Lleida (La Vanguardia 2013)

Este edificio patrimonial ha sufrido daños y momentos de abandono. En 1707 fue conquistada por Felipe V y dada su posición estratégica la catedral pasó a ser un cuartel militar, olvidando su función religiosa. El uso militar ocasiono daños al edificio patrimonial, especialmente con los bombardeos de guerra civil los más graves, especialmente en las terrazas y cubiertas, arruinando elementos decorativos como los pináculos, gabletes, gárgolas y alféizares de la terraza de cubierta.

Durante la segunda mitad del siglo XIX con el movimiento catalán de la *Renaixença* se revalorizo la Catedral, llegando al 12 de junio de 1918 cundo se declara monumento nacional (Lérida s.f.), en 1948 el ejercito la cedió y en 1949 se inició su restauración.

En la restauración de 1949 llevada a cabo por los arquitectos Francisco Pons Sorolla y Alejandro Ferrán se modificaron y sustituyeron elementos, como las tracerías y parteluz de las ventanas góticas, las cuales fueron reconstruidas copiando los originales con moldes y cemento artificial. Las reformas llegaron hasta finales del siglo XX.

Los elementos que se exploraran en el caso de estudio son:

Portadas a los pies del templo siglo XIII, estilo románico. Eran las puertas principales de la Catedral, hasta que se construyó el claustro, corresponden a puertas en una de las naves interiores de la catedral. En la Ilustración 123 se ve que la puerta central es la más grande, también la más trabajada y elaborada, dispone de seis archivoltas decoradas con motivos geométricos que descansan en columnas con capiteles, sobre esta puerta hay un rosetón central permite la iluminación del interior de la nave. Las puertas laterales son de medio punto, son más pequeñas que la central y disponen de un guardapolvo decorado con puntas de diamante.

La puerta de las Fuentes es la que está del lado del evangelio, destaca por su labrado y por las 4 escenas de la Biblia. El resto de los capiteles de ambas puertas se resuelven mediante entrelazados y filigrana de tipo vegetal (JDIEZARNAL 2010)

El tipo de portada se ha denominado de *"Escuela leridana"* y se ha exportado a diversos lugares de la Corana de Aragón, la decoración de las arquivoltas es básicamente de tipo geométrico, por debajo de la cornisa se dispone una línea de canecillos, se caracteriza por carecer de tímpano, y porque sobresale respecto al muro, añadiendo volumen a la portada.

El claustro construido entre siglo XIII - siglo XIV. El estilo del claustro es gótico, aunque sigue pautas del románico tardío hasta llegar al gótico pleno. La cubierta es de bóvedas de crucería, con grandes losas de piedra planas, ocho grandes contrafuertes dos por lado en las caras interiores del claustro. Es característico de este claustro la decoración de los capiteles, de tipo románico en las zonas más cercanas al templo, con motivos de tipo vegetal, geométrica y zoomorfa, mientras que en los capiteles de estilo gótico predomina la decoración de tipo ornamental. Cabe destacar las gárgolas situadas en los ángulos del claustro y en la parte superior de cada uno de los contrafuertes desaguan el agua de lluvia hacia el centro del claustro donde se halla el jardín (JDIEZARNAL 2010).

5.3.1 Análisis geométrico de la superficie

Partimos de la necesidad de explotar las características geométricas que nos da la información TLS, al ser una herramienta que nos permite trabajar de forma digital la información en tres dimensiones de edificios patrimoniales, sobrepasando su visualización o como herramienta de documentación a ser una base para análisis y futuros trabajos en la tarea de conservar el patrimonio.

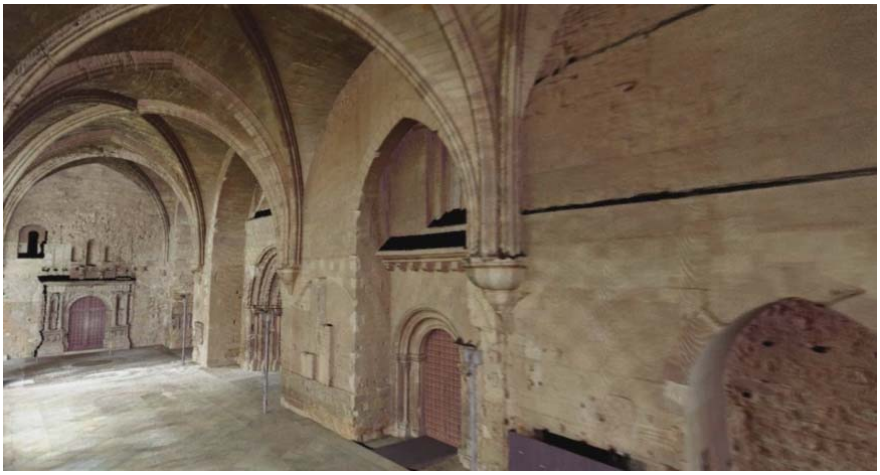
> ***"****El problema es que la nube de puntos son muy espectaculares, sobre todo cuando los mueves, y los manipulas, pero en el fondo fuera de esa visión espectacular, son muy poco útiles, para quien realmente tiene que trabajar con esa información, en ese sentido creo que los documentos que has generado a partir de las nubes de puntos está mucho más cerca de lo que es utilizable, en lo que es documentos de trabajo en el patrimonio.* ***Es de las primeras veces que veo una elaboración de la nube de puntos; hacia la elaboración de un documento gráfico útil, tanto de análisis, estudio del patrimonio, como de conservación, por eso me parece que es bastante positivo."***
>
> *Entrevista Antonio Almagro Gorbea (pregunta 1)*

5.3.2 Toma de datos TLS

El escáner utilizado se basa en la diferencia de fase, el Faro Focus^{3D} permite un rango de captura amplio 360º H * 305º V, con una precisión de 0.6 mm a 10 m, 0.95 mm a 25 m (con una longitud de Honda de 905 nm), con un error sistemático de ≤ ± 2 mm a 25 m, aparte de la información de intensidad reflejada del láser se capturan fotografías, con información de color RGB que se asignan a los puntos, mediante una cámara integrada de 70 mega pixeles, Ilustración 117.

Se realizó una posición de escaneo en cada arco del pasillo escaneado, en el patio de la Seu Vella, la resolución de escaneo fue de 1/8, con 4x de calidad en relación al programa *faro scene*, el cual se usó para operar el escáner, esta calidad hace referencia al número de comprobación es para reducir el error del levantamiento, obteniendo por posición en promedio 38 millones de medias, en total se realizaron 7 posiciones.

Ilustración 117: Nube de puntos 3D



Fuente: Propia

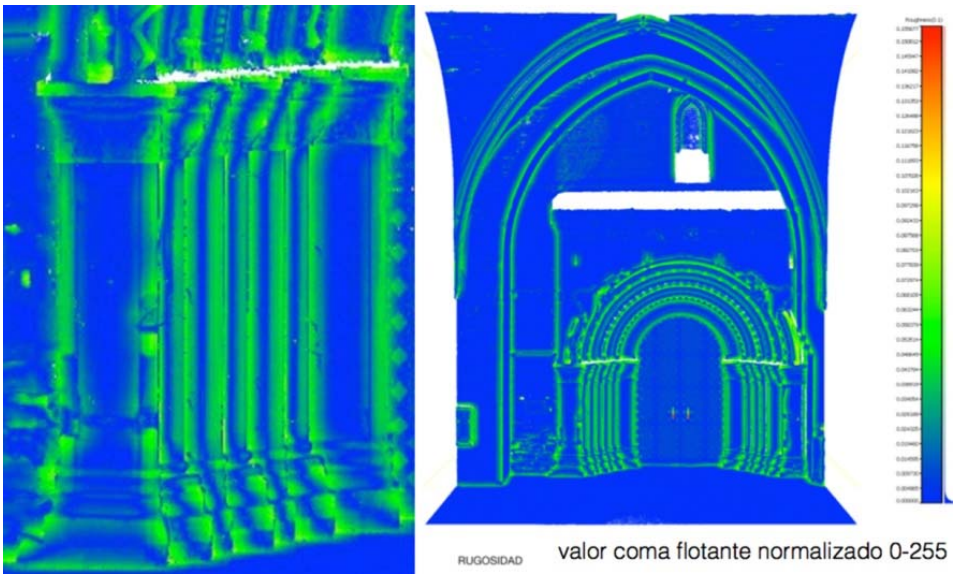
5.3.3 Bases de datos 3D que resaltan características del bien arquitectónico

Partimos de que las bases de datos que analizamos parten de una nube de puntos, la cual permite destacar principalmente características de la geometría, a partir de esta premisa el enfatizar aspectos de la geometría realizamos cuatro procesos sobre la nube de puntos. El análisis por curvatura de la superficie, la dirección de las superficies, la clasificación de las superficies y la iluminación de la superficies, todo ello en tres dimensiones, añadiendo un campo en cada punto, para albergar esta información, todo en un único modelo, que posteriormente se convertirá en bases de datos en dos dimensiones, que se podrán combinar y si es necesario volver a integrarse en un modelo en tres dimensiones. Estos procesos sobre la nube buscan destacar la geometría, aun así en proyectos con objetivos concretos estos análisis variarían, en función a las necesidades de los especialistas.

> ***"Habría que saber muy claramente que aplicaciones concretas tendría un determinado proceso de filtrado**, de generación de las imágenes, que es capaz de generar. No soy capaz de ver para que caso concreto valdría que cosa, **eso tendría que ser objeto de un intercambio de ideas e información más extensa. Creo que esas informaciones en algunos casos los dibujos ya son suficientemente elocuentes, en otros casos convendría superponerlos con dibujos vectoriales,** también porque los dibujos vectoriales muchas veces facilitan oros procesos que son necesarios en el proyecto, como las mediciones de superficies, los grafiados de zonas a intervenir, lo que se hace a través de dibujo vectorial."*
>
> *Entrevista Antonio Almagro Gorbea (pregunta 4)*

Primero la definición de los **límites de los elementos por curvatura** que definen la fachada, en este caso a través de análisis que por curvatura permitan identificar cambios entre superficies, delimitarlos y dar un valor, en tres dimensiones se tienen en cuenta todas la direcciones (Ilustración 118) y en dos dimensiones sería un análisis de pendientes.

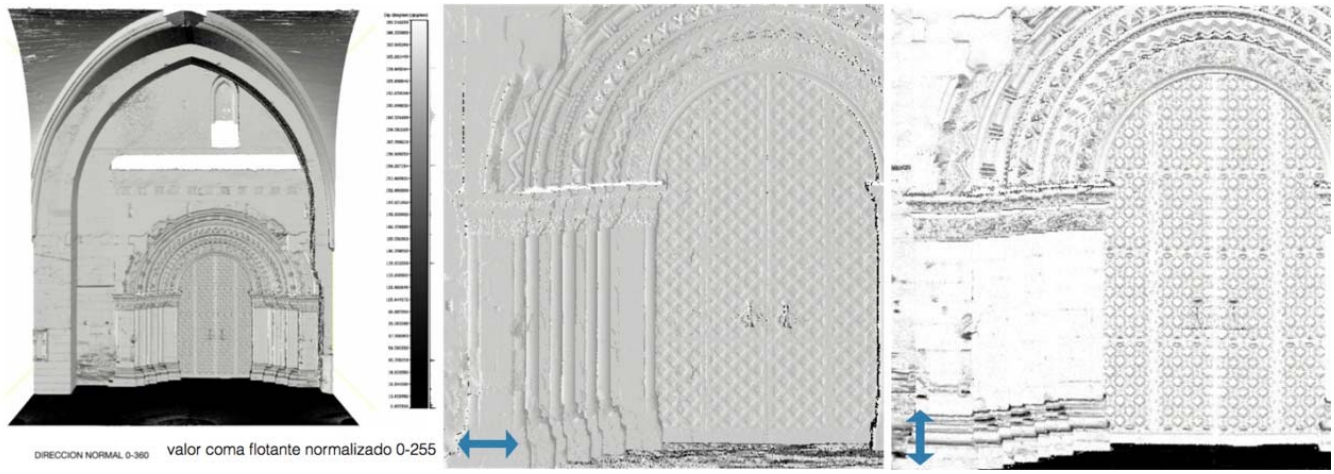
Ilustración 118: Análisis por curvatura y rugosidad en 3D, analizando las superficies en todas las direcciones



Fuente: Propia

Dirección de las superficies en tres dimensiones, a través de la conversión de la información de la normal en temáticos de color, que permiten dividir en dos esta orientación, viendo la fachada perpendicularmente generando un valor de dirección en horizontal y en otra capa generando valores respecto a la geometría para sacar valores verticales, usando técnicas de topografía del ArcGis. Con ello conseguimos destacar los bordes de los elementos en relación a una dirección como se ve en la Ilustración 119.

Ilustración 119: Normal, dirección de las superficies en horizontal y vertical



Fuente: Propia

La **clasificación** de los cambios en las superficies, como lo son las aristas, planos, o volúmenes. Esta clasificación no solo se realiza solo de elementos constructivos, se clasifica todo lo que integra el bien arquitectónico, constituido por elementos de interés patrimonial, un ejemplo muy claro de esto son las numerosas lápidas funerarias, sepulcros de nobles y canónigos del claustro (Ilustración 120 e Ilustración 121). En el ala este están enterrados canónigos y a la nobleza, y en la galería norte canónigos foráneos y ciudadanos importantes, como por ejemplo el maestro de obras Pere de Prennafeyta.

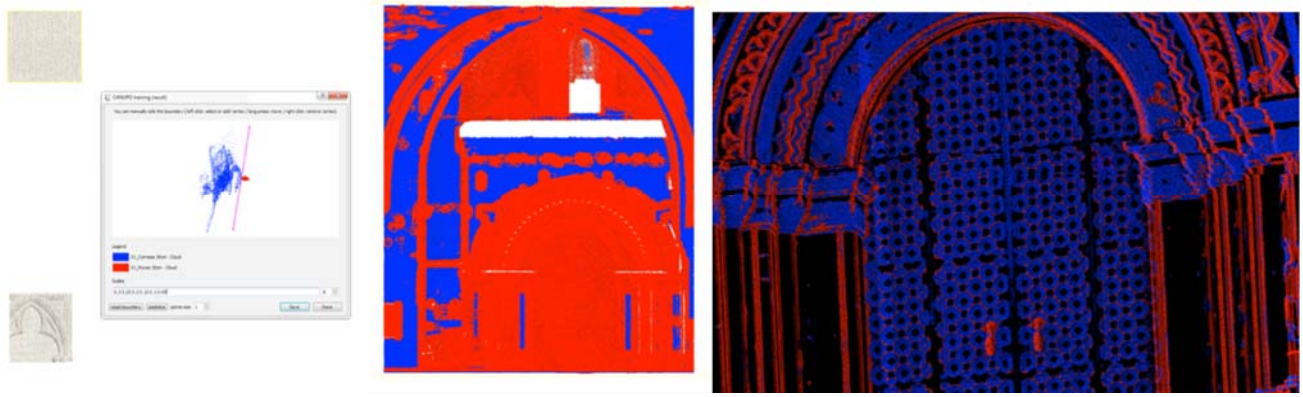
La clasificación de la nube de puntos se introduce como un dato, un número para cada punto, la definición de estos números de clasificación o códigos varia para cada proyecto, en relación a la escala y capas usadas, pero siempre teniendo en cuenta el usar los códigos usados en las clasificaciones LiDAR aéreo si coinciden, por ejemplo en el caso estudiado tenemos suelo, por ello usamos el número 2 para su codificación, el resto de las superficies las clasificamos con números de uso libre, como se indica a continuación.

Clasificación	**Código**
Suelo	2
Mobiliario-otros	7
Muro	20
Superficies curvas (cilindro)	21
Superficies ornamentales	22
Lineales	23

También usamos el campo de retorno como una segunda clasificación, que nos permite ocultar elementos que no queremos tener en cuenta en pasos siguientes de conversión a imágenes ráster, como lo pueden ser el techo, muebles o el mismo suelo, dejando despejada la información de muros de fachada.

Retorno	**Código**
Primeros 2m de la fachada	1
Desde los 2m de la fachada (techo sin desdoblar)	2
Mobiliario-otros	3
Suelo	4

Ilustración 120: *Clasificación de superficies naturales aplicado a edificios. Técnica usada clasificación CANUPO*



A B

A) Clasificación de muros / geometría más compleja. Escalas 30cm a 5cm
B) Clasificación elementos lineales / ornamentales. Escala 10cm a 2cm

Fuente: Propia

Encontrar **detalles de las superficies mediante la simulación de la iluminación,** en este caso se utilizó la técnica de iluminación por oclusión ambiental (*ambient occlusion* también llamada "luz de cielo")[68]. La técnica de iluminación por oclusión ambiental permite identificar zonas que están poco expuestas, concavidades de la superficie como zonas porosas, alteraciones del material o simplemente huecos, al estar ocluidas por una superficie o superficies ocluidas entre sí, tanto para análisis de nubes de puntos como en mallas (Ilustración 121).

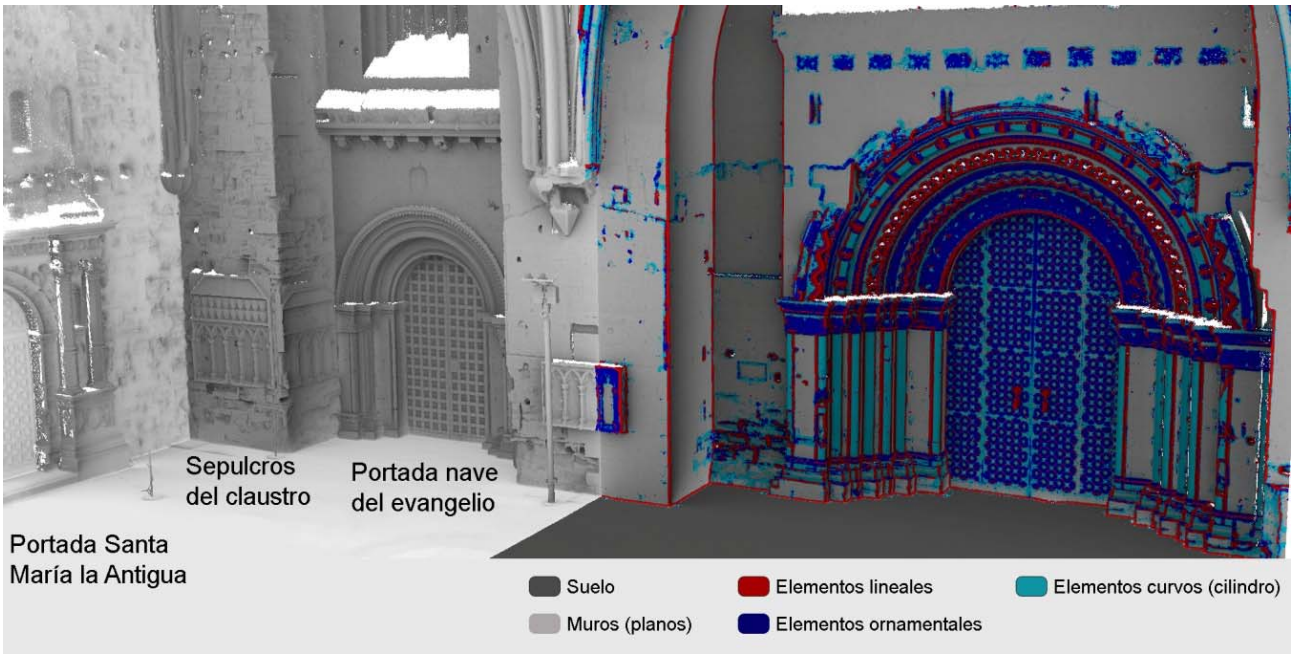
El cálculo de la oclusión de la superficie parte de un proceso de iluminación virtual, la mayoría de las veces esta iluminación se consigue con rayos o fotones que rebotan entre las superficies de las geometrías, estos fotones no iluminan la superficie sino que sombrean las áreas según el número de rebotes, entre más rebotes más oscuro, si la superficie es perpendicular al cielo o no tienen rebotes no se oscurecerán manteniendo su color de base, mientras que las que se oscurecen forman parte

[68]Es un método de sombreado (*shading* 3D), que se utiliza en el campo de gráficos por computación, para añadir realismo a los modelos, por medio de la atenuación de la luz debido a la reflexión y a las oclusiones que se producen por la geometría del modelo. Es una técnica para producir sombras rápidas, suaves y difusas en espacios abiertos mediante el uso de *raytracing*. Es un método global, en la medida de que cada punto de luz que tiene contacto con la superficie opera en relación con las otras geometrías, definiendo en la escena que zonas son claras y cuales oscuras, basado en la proximidad de las superficies (Tutorial Comparativa luz natural s.f.).

de un postproceso, en el cual entre mayor sea el número de pasos más definido estará el sombreado (cgnauta.blogspot. 2008).

Tanto el algoritmo como el código usado se puede encontrar en el enlace:
https://github.com/cloudcompare/trunk/tree/master/plugins/qPCV
https://github.com/cloudcompare/trunk/blob/master/plugins/qPCV/qPCV.cpp

Ilustración 121: *Iluminación por oclusión ambiental y combinación con otros análisis como el de clasificación CANUPO*



Fuente: Propia

5.3.4 Conversión 3D a 2D y 2.5D

Partimos de una premisa, de la necesidad de trabajar la representación de los edificios tanto en tres dimensiones como en dos dimensiones, por ello enfatizamos en esta conversión. La importancia de esta conversión trasciende las disciplinas involucradas en el patrimonio, como comenta Reinal en la entrevista que comentamos a continuación, siendo un arqueólogo-historiador.

La conversión de datos de 3D a 2D la generamos de tal forma que podemos convertir una base de datos en una imagen ráster a escala, que al ser datos estructurados podamos regresar al 3D.

Para ello partimos de un formato LiDAR aéreo, el LAS dataset, que nos permite **organizar la topología de los puntos, incluyendo variables como el color, la elevación, la clase, el retorno que utilizamos como otro tipo de clasificación y la intensidad.**

Como hemos realizado procesos para ampliar la información geométrica de las superficies, como la simulación de luz ambiental, necesitaremos más campos de información en el LAS dataset, por ello

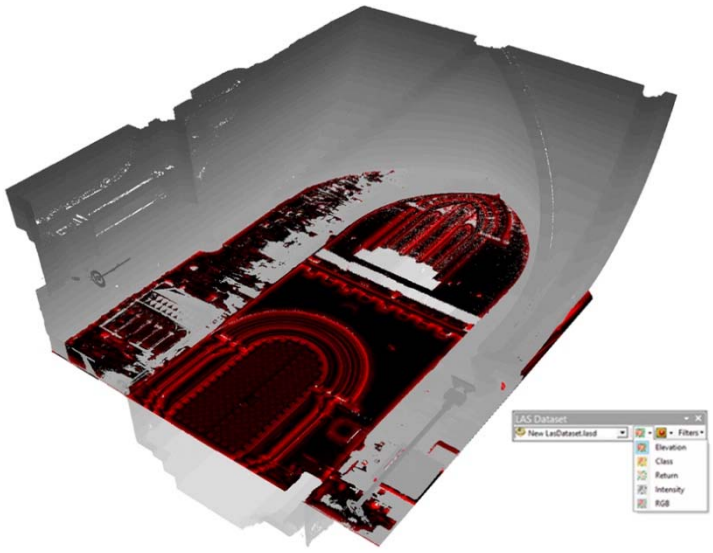
construiremos más de uno de estos archivos, cada uno con información diferente, que nos permita generar de forma ágil los LAS dataset to Ráster, desde programas GIS.

Entendiendo también que los LAS dataset permiten incluir nubes de puntos de gran extensión, al estar estructuradas de tal forma que permiten una adecuada gestión de la información con diferentes niveles de detalle y en octree, en función a la distancia, a diferencia de otros formatos como el multipunto, que permite un limitado número de puntos, en relación al tamaño de los proyectos que se pueden generar con un Faro Focus^{3D}. Ejemplo de ello es la Ilustración 122, una nube de puntos en 3D, el LAS dataset 2, con información de profundidad y ráster de rugosidad con un temático de en rangos de rojo a negro.

Los LAS dataset que generamos son:

- LAS dataset 1: RGB + intensidad + clasificación + retorno
- LAS dataset 2: Clasificación con *ambiento occlusion* como RGB + rugosidad de la superficie como valor de intensidad + clasificación + retorno
- LAS dataset 3: Normal x normal y rugosidad de la superficie como RGB + *ambiento occlusion* como intensidad + clasificación + retorno

Ilustración 122: LAS dataset 2 en 3D, valor de elevación y ráster de rugosidad con una resolución de 0,5cm



Fuente: Propia

A partir de estos LAS dataset construimos las imágenes ráster, utilizando las capas de información LAS, para generar cada una de las bandas de los ráster, con una resolución que parre de las distancias entre puntos, siendo la distancia de los ráster de la Ilustración 123 e Ilustración 124, la media entre las distancias de los puntos de las superficies. Las zonas más densas de puntos tendrán más detalle y las que tengan menos densidad de puntos se interpolara la información, con un rango máximo e distancia, para impedir que se interpolen superficies que no tienen relación. La explicación de este proceso se amplía en el Capítulo 4. CONVERSIÓN 3D A 2D Y 2.5D.

Entendemos que la tecnología TLS tiene un gran potencial para generar ráster que destaquen la topografía de las fachadas y la información geométrica de fachadas basada en imágenes de profundidad TLS, esta información de profundidad la consideramos un Modelo Digital de Elevaciones (MDE).

Ilustración 123: Claustro y portadas de la Catedral. Resolución 0,5cm pixel, filtro para cada banda y recomposición como RGB

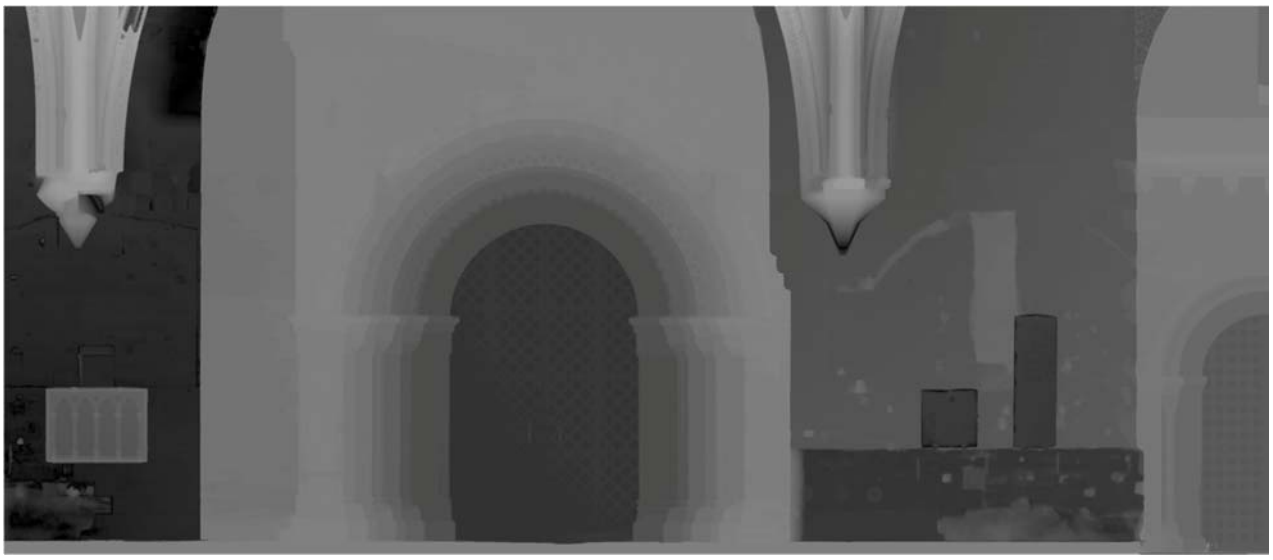
1 2 3

1 Portada a los pies de la nave del evangelio, 2 Portada central, 3 Portada a los pies de la nave de la epístola.

Fuente: Propia

El MDE aparte de complementar la información 2D con un análisis en 2.5D y de permitir realizar análisis que destacan variables geométricas del edificio, con técnicas de topografía o LiDAR aéreo, da la posibilidad de volver a un modelo en tres dimensiones, al conservar el valor de profundidad, este se puede convertir en un valor z, que al estar corregistradas con otros mapas permite que estos se crucen y volver a tener una nube de puntos en 3D, que aparte de lo geométrico puedan almacenar otras informaciones fruto de los análisis en 2D.

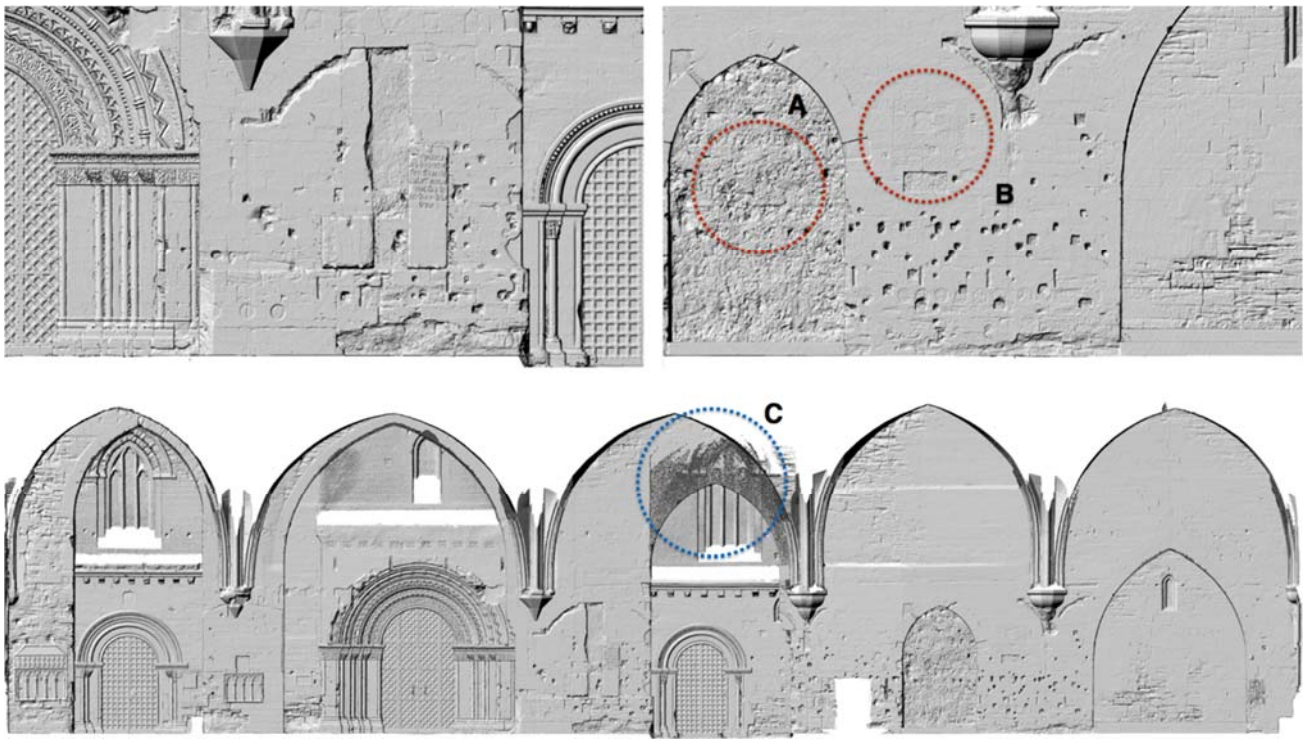
Ilustración 124: Modelo Digital de Elevaciones. Ráster Elevación falso color. Resolución 0,5cm pixel, interpola vacío de información en relación al pixel vecino



Fuente: Propia

Un MDE como el de la Ilustración 124 no solo contiene información explícita acerca de la elevación, sino que también aporta información relativa a las relaciones (distancia y vecindad) entre los diferentes valores de altitud, que se pueden calcular con diversos procedimientos de álgebra de mapas, que son comúnmente aplicados en análisis topográficos, como *Hillshade* o análisis de pendientes Ilustración 125.

Ilustración 125: Ráster Hillshade[69] 315º acimut 45



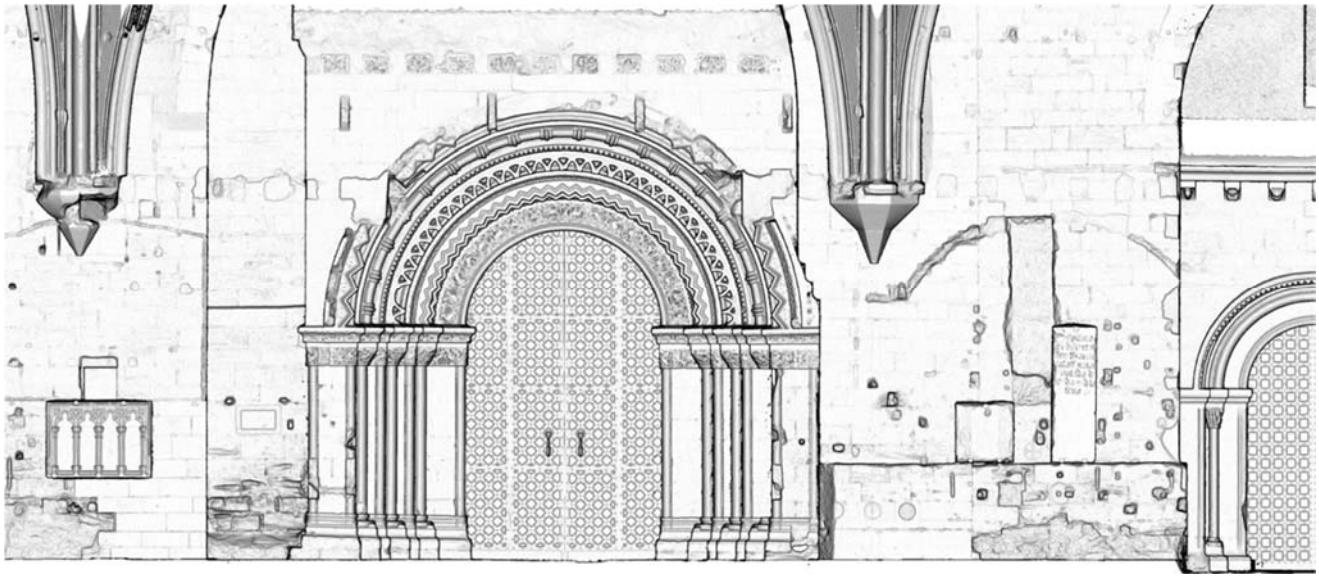
A) Textura no visible desde fotografías, B) Textura no visible a simple vista, C) Error metodológicos: ruido por falta de información en zonas con planos a distintas profundidades

Fuente: Propia

En la selección C de Ilustración 125 se genera un ruido, que corresponde a la mala triangulación entre puntos que corresponde a dos planos diferentes, ya que al tener el plano superior baja resolución, permite que se calcule los puntos del plano inferior, en la construcción del ráster *Hillshade.* Este proceso se puede evitar al aplicar un filtro de *media* sobre los puntos, con ello los puntos que saltan del promedio se eliminan, en este caso correspondientes a los puntos del plano inferior, los cuales son aleatorios, al presentarse solo cuando no existen puntos del plano superior, entendiendo que el filtro de media lo que hace es eliminar los puntos que están fuera del promedio, en relación a unas retícula y a un proceso de interpolación predefinidos. Este error del ráster, que en principio es metodológico se ha mantenido en el ejemplo citado, para demostrar el problema específico, pero se le aplico el filtro de media a los otros ejemplos mostrados en la tesis, entendiendo que el filtro de media aplicado se tuvo en cuenta, en relación al detalle requerido en los objetivos del caso de estudio.

[69]Sombreado Topográfico (Hillshade): superficie que muestra el grado de iluminación de los píxeles de acuerdo a dos posiciones relativas, una respecto a la orientación o ángulo acimutal, y otra respecto al ángulo de elevación solar o cenital.

Ilustración 126: Análisis de pendientes



Fuente: Propia

> ***"A mí el 2D me sirve para trabajar**, pero ya llevo años, muchos años además, en los que me he dado cuenta que **si yo no traslado esto a un proceso de 3D, se pierde cantidades ingentes de información** del trabajo que haces. Trabajo en 2D, pero siempre lo devuelvo en 3D, porque si no, no lo ves, de otra forma le haces **un flaco favor a la arquitectura histórica, al patrimonio construido, si no le das esta salida.** Con esto la gente entiende lo que has hecho y que le estas explicando, si no, no entienden nada"*
>
> *Entrevista Reinald Gonzàles (pregunta 4)*

EL análisis de pendientes permite identificar:

Al delinear los límites entre superficies, se logra representar detalles a diferentes escalas y con diferentes magnitudes, partiendo de los límites tecnológicos y metodológicos predefinidos.

Una técnica para detectar límites entre superficies son los análisis de pendientes (*Slope*), por ejemplo desde el *SIG* se considera como el ratio máximo de cambio de valor de altura entre una celda y las celdas vecinas, igualmente se puede definir como un ángulo existente entre el vector normal a la superficie en ese punto y la vertical.

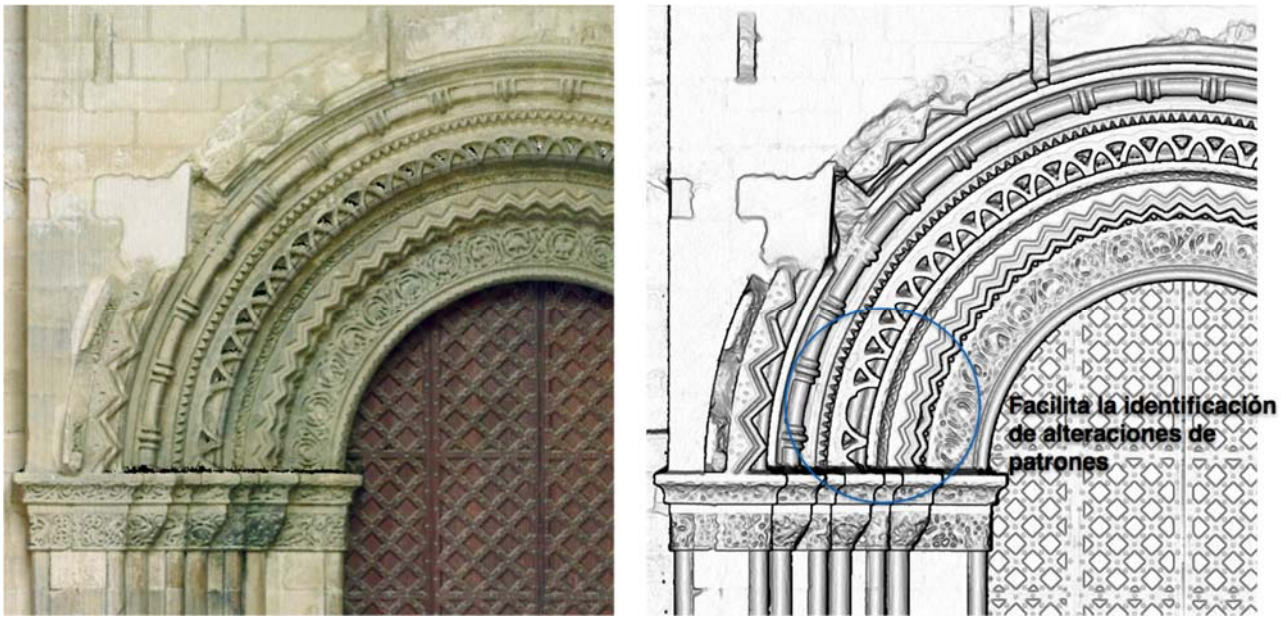
Desde el campo de la topografía Geomántica la pendiente se puede conseguir a partir de algoritmos que tengan en cuenta:

- Pendiente máxima de la celdilla central con respecto a los valores vecinos, adecuado para evaluación de la erosión
- Pendiente media de la celdilla central con respecto a cada uno de los valores vecinos
- Pendiente en el sentido del flujo descendente, adecuado en celdillas correspondientes a cauces en aplicaciones de tipo hidrológico
- Ajuste de una superficie a los 9 valores de elevación correspondientes a la celdilla central y sus 8 celdas vecinas

Es importante conocer el método con el cual se efectúan análisis de Pendientes, ya que puede cambiar considerablemente el resultado final y con ello la representación del plano por pendientes, especialmente cuando se requiere una resolución y un nivel de detalle predefinido al inicio de la elaboración de los planos, a partir de la tecnología TLS.

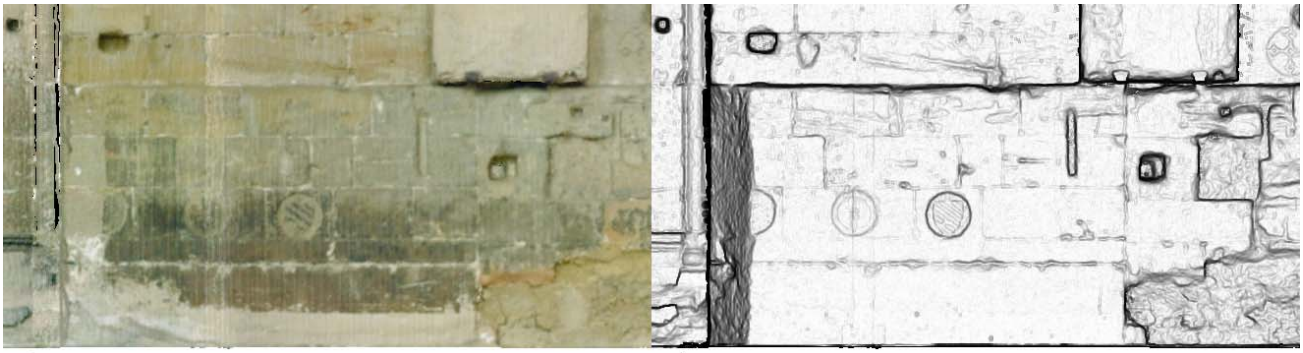
En la Ilustración 127 se hace uso de un filtro o Kernel, con una matriz de 3x3 píxeles, que va recorriendo el ráster para obtener el valor de pendiente del pixel respecto a sus vecinos, basado en parámetros de diferencia de altura producto de restar el valor del pixel central y los 8 restantes. Con esos parámetros basta con aplicar las siguientes fórmulas para así obtener la pendiente del pixel con respecto a los píxeles vecinos, quedándonos sólo con la pendiente mayor.

Ilustración 127: Ráster de pendientes obtenido mediante Spatial Analyst



Fuente: Propia

Ilustración 128: Permite ampliar los detalles de la superficie



El análisis topográfico ayuda a ampliar los detalles de la superficie. Ejemplo de ello son los escudos tallados en la piedra se logran representar con un análisis de pendientes.

Fuente: Propia

El cálculo de pendientes de la ilustración 4 se obtiene por el cálculo de pendientes en el programa ArcGis, (ARCGIS 2012), con la técnica desarrollada por (JONES 1998).

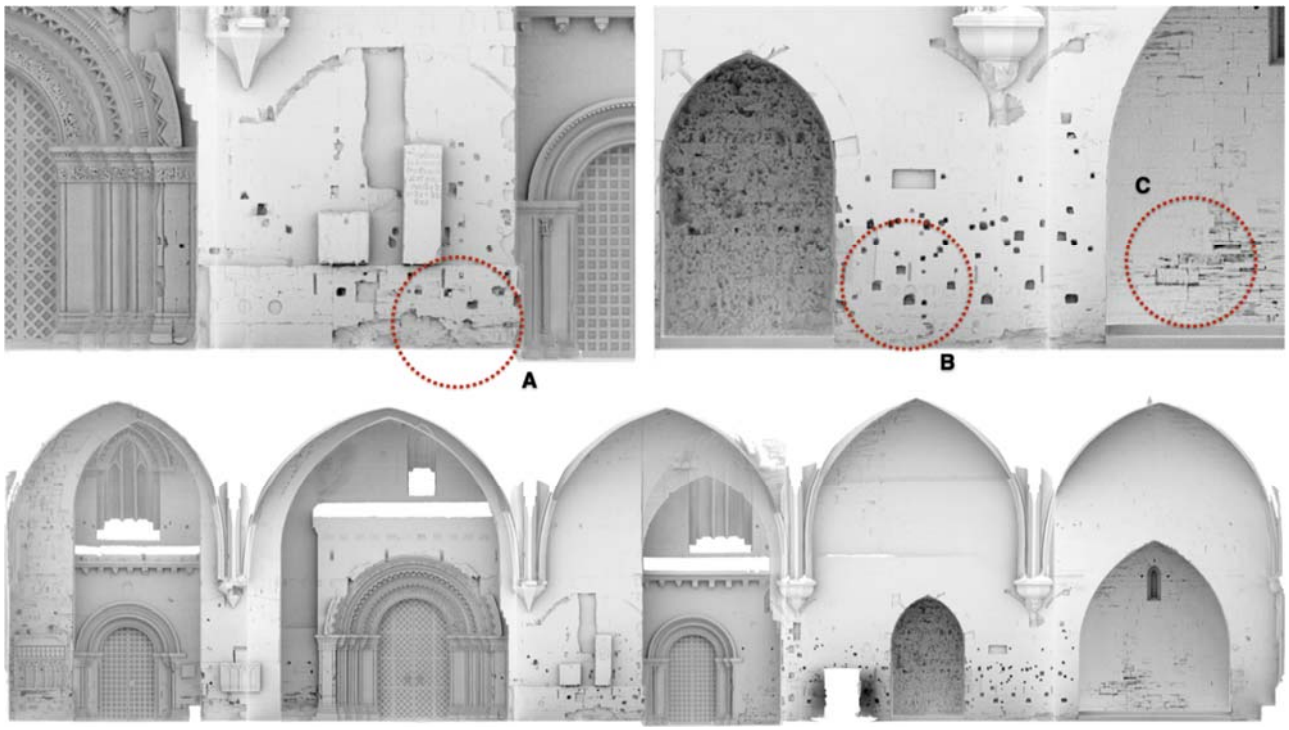
La pendiente en grados se interpreta como:
slope_degrees = ATAN (√ ([dz/dx]^2 + [dz/dy]^2)) * 57.29578
El valor 57.29578 proviene de 180/pi.
El algoritmo se puede interpretar como slope_degrees = ATAN (%pendiente) * 57.29578
En donde %pendiente = √ ([dz/dx]^2 + [dz/dy]^2)

a	b	c
d	e	f
g	h	i

La distancia este-oeste a través de la celda (anchura de la celda) se puede calcular como:
[dz/dx] = ((c + 2f + i) - (a + 2d + g)/(8 * tamaño de la celda)
dy = la distancia norte-sur a través de la celda (altura de la celda) se puede calcular como:
[dz/dy] = ((g + 2h + i) - (a + 2b + c))/(8 * tamaño de la celda)

Los detalles con poco relieve tienen un valor de línea menor, al ser una pendiente menor que los cambios entre superficies con diferentes planos de profundidad, lo cual permite diferenciar con mayor facilidad los elementos que componen la fachada.

Ilustración 129: Ráster 2D de la iluminación por oclusión ambiental generado en una nube de puntos 3D



A) Perdida de material, B) Orificios y alteraciones de la piedra, C) Deterioro de la piedra, diferencia de la porosidad de piedras en una misma fachada

Fuente: Propia

5.3.5 Comparativa 3D – 2D y 2.5D

Al ser la información Ráster datos controlados, podemos regresar esa información a un modelo en tres dimensiones, pero en este proceso caven hacerse varias preguntas, que información nos da el 3D y el 2D (2.5D), en qué momento utilizar cada cual, como se complementan.

Por los ejemplos desarrollados entendemos que la información debe manejarse de tal forma que permita siempre retornar a la posición de inicio, ya sea manteniendo en el metadato las alteraciones o documentando los proceso, de tal forma que podamos reconvertir la información, o detallar las alteraciones de esta en función de los resultados obtenidos, y aún más importante dar el soporte a otras disciplinas que trabajan en formatos específicos, el poder integrar su información con otros estudios, que el trabajo en un formato no sea una limitante, mientras se mantenga la precisión métrica y la posición de los datos al estar corregistrados.

> *"Comenzaría como lo has hecho tú. Me da las suficientes pistas para saber por dónde quiero llevarlo.* ***Este discurso de ida y de vuelta, es el que es productivo intelectualmente****, es el que te da las pistas para exigirle mucho más. Siempre necesitaría a parte del 2D ese mismo punto pero en vista 3D, pues es lo que te permite saber hasta donde puedes llevarlo.* ***La idea no es tener un producto que genere un producto final, si no tener un producto que genere un montón de productos finales."***
>
> *Entrevista Reinald Gonzàles (pregunta 6)*

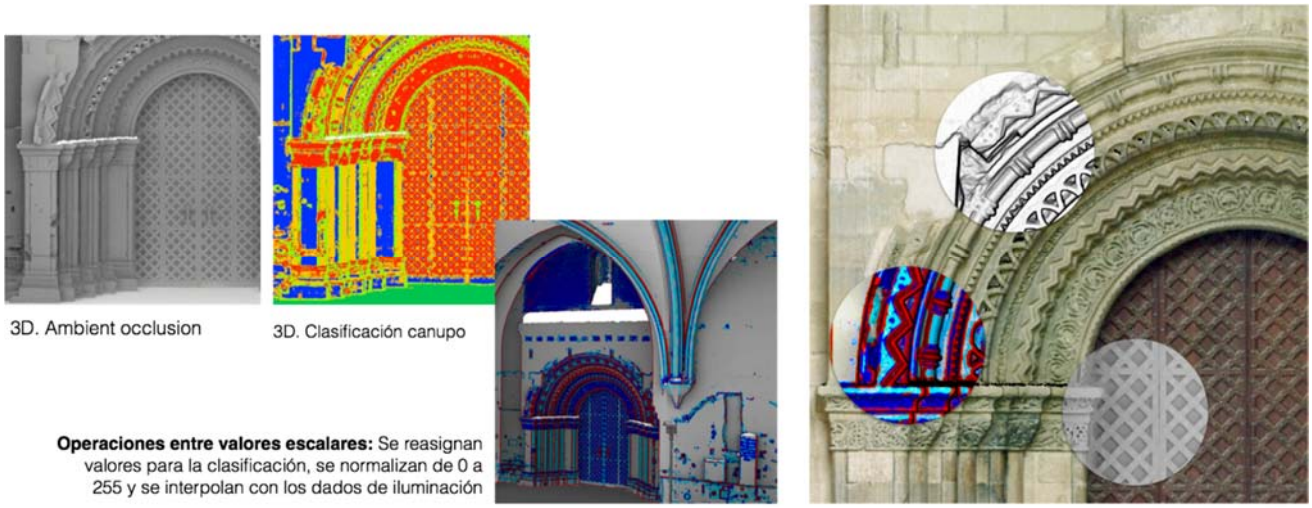
Comparación de la información 3D con la 2D – 2.5D

3D. La información de las nubes de puntos permite realizar operaciones entre los datos, generando nuevas bases de datos sin alterar la información base. Una nube de puntos puede contener diferentes valores como valores escalares.
2D. Permite interpolar, comparar y procesar diferentes imágenes.

Manipulación e interpretación. Capas de información
Operaciones entre valores escalares: Se reasignan valores para la clasificación, se normalizan de 0 a 255 y se interpolan con los dados de iluminación

- 3D. La información de las nubes de puntos permite realizar operaciones entre los datos, generando nuevas bases de datos sin alterar la información base. Una nube de puntos puede contener diferentes valores como valores escalares.
  La información RGB TLS se recoge desde diferentes posiciones necesitando optimización. La lectura y manipulación es de carácter visual o de procesos de renderizado, entendiéndola como una información base que necesita ser procesada.
- 2D. Permite interpolar, comparar y procesar diferentes imágenes.
- La información se filtra y optimiza, permite procesos que facilita la identificación de alteraciones en patrones de la superficie.

Ilustración 130: Comparativa de capas en 3D y en 2D (2.5D)



Fuente: Propia

"*Los levantamientos en 2D y 3D pueden aplicarse en las diferentes especialidades de Conservación y Restauración del Patrimonio histórico-artístico: Pintura de caballete, pintura mural, escultura y patrimonio arquitectónico. En caso de tener el levantamiento en 2D complementado con una escala de medición, se pueden detallar los* ***porcentajes de cada deterioro sobre la superficie total, que servirán para delimitar de una forma más precisa cuales son los daños más importantes y más extensos y de esta manera realizar un presupuesto lo más ajustado y específico posible****. El levantamiento en 3D se puede aplicar a obras volumétricas (fachadas arquitectónicas y esculturas volumétricas), sean o no exentas, en las que se precise y sea necesaria una información de todos su ángulos****. El 3D sirve de apoyo y complemento informativo al croquis de daños base, desarrollado en un levantamiento en 2D."***

Entrevista Elena Urueña (pregunta 1)

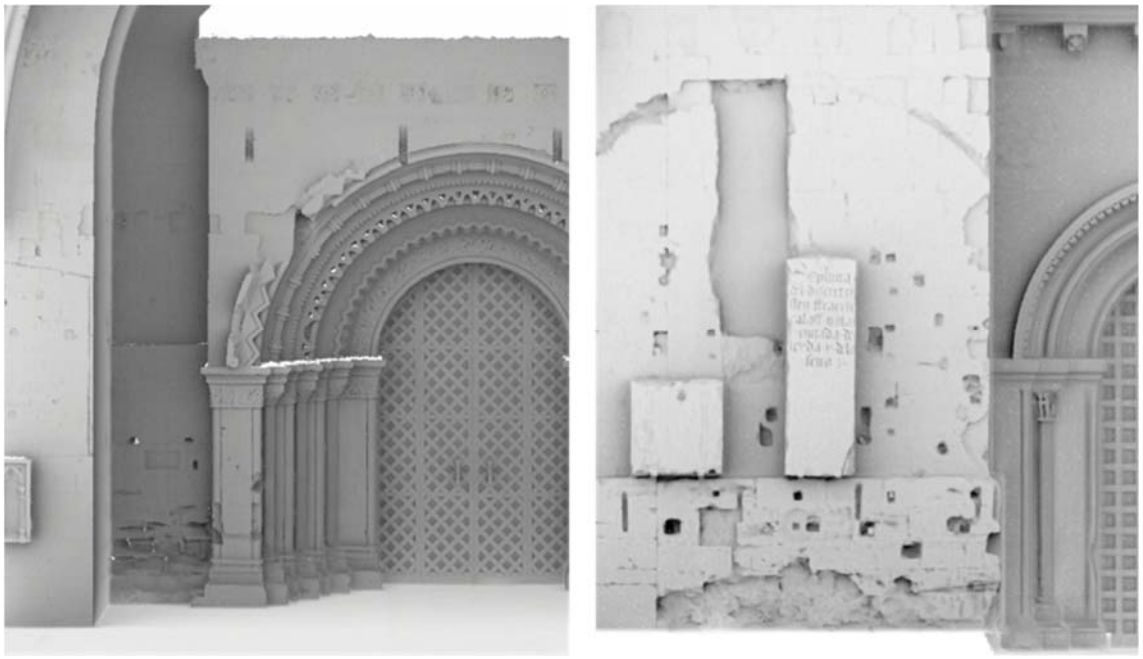
"En tanto que usuario habitual de este tipo de representaciones, entiendo que ambas aportan informaciones similares, el único problema es que el manejo que de los modelos 3D, o de un modelo de información en 2D, en el caso del modelo ***2D es más fácil, más asequible, más intuitivo, y el modelo 3D exige una capacidad de manejar el visor, el elemento para orientarte ortogonalmente, isométricamente, en cambio un 2D es un 2D, es básico****."*

Entrevista Ernest Redondo Dominguez (pregunta *1)*

"…en una nube de puntos 3D tienes todos los puntos, pero tienes demasiada información como para saber cuáles son los puntos claves, hay un proceso de entenderlos, analizarlos, seleccionarlos, decidir, tomar decisiones, ***es un proceso complicado, no es fácil, con lo que están utilizando los alumnos en clase, con lo que es software habitual, no es fácil."***

Entrevista Ernest Redondo Dominguez (pregunta *4)*

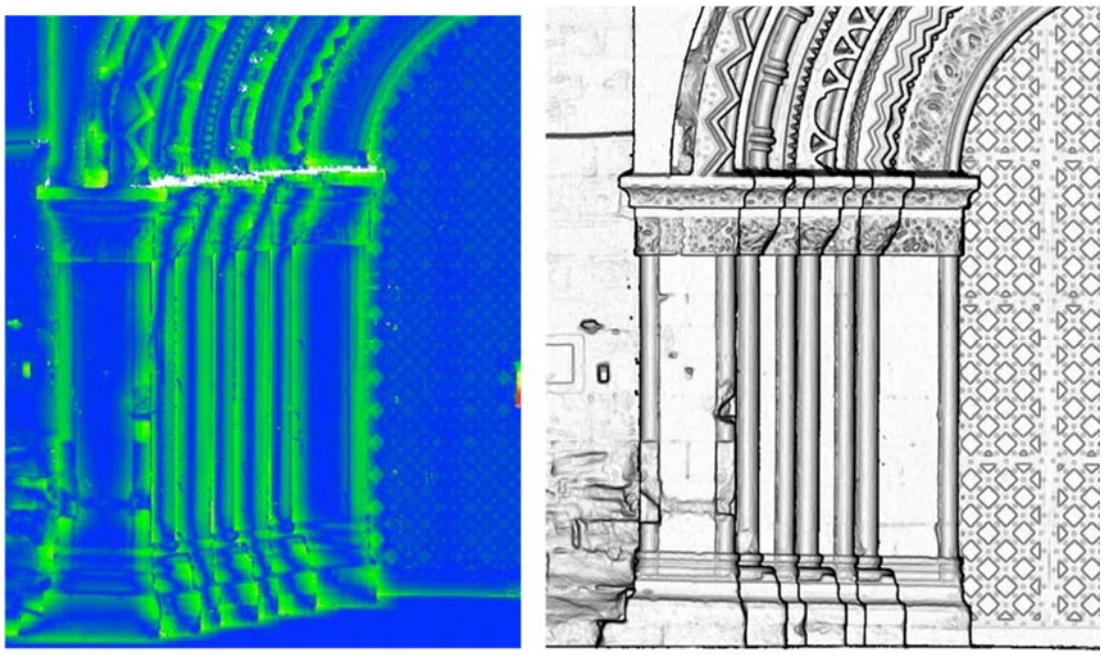
Ilustración 131: Comparativa entre la representación de iluminación por oclusión ambiental en 3D y los ráster 2D



Fuente: Propia

- 3D. La calidad de la visualización depende del tamaño del punto, la distancia a la cámara, la forma del punto y el solape entre puntos.
- 2D. La calidad de la visualización depende de la resolución del ráster.

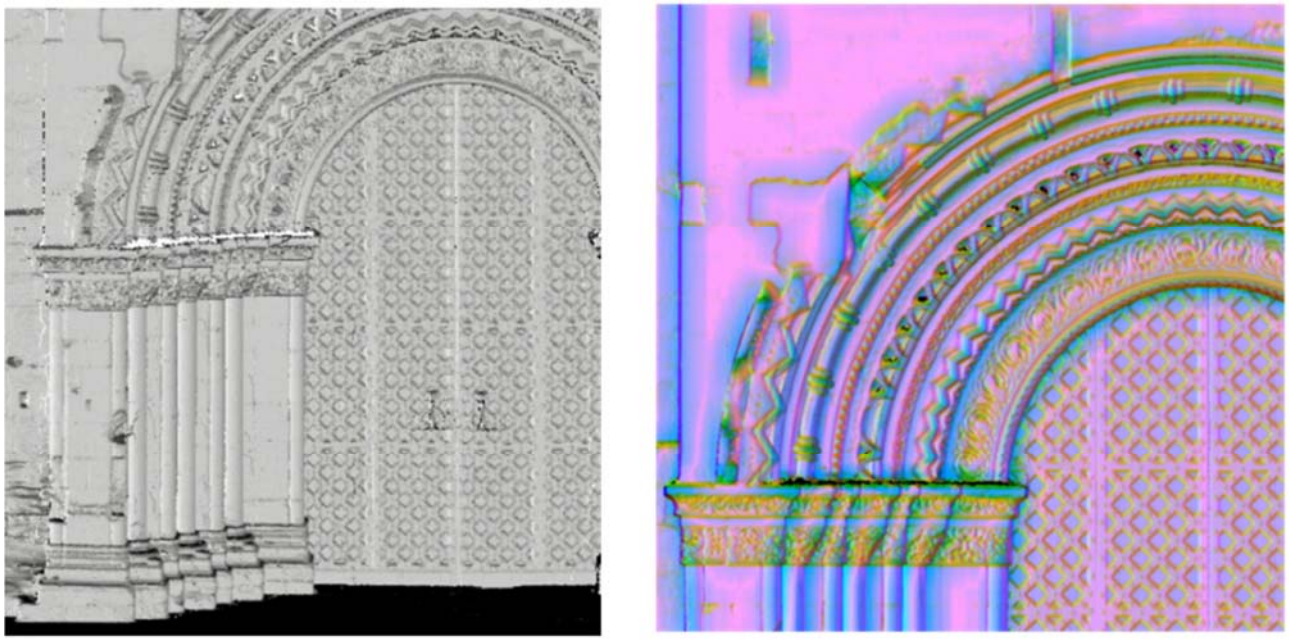
Ilustración 132: Curvatura superficie



Fuente: Propia

- 3D. Análisis de curvatura en todas las direcciones.
- 2D. Análisis de curvatura se realiza en función a la pendiente de la altura.

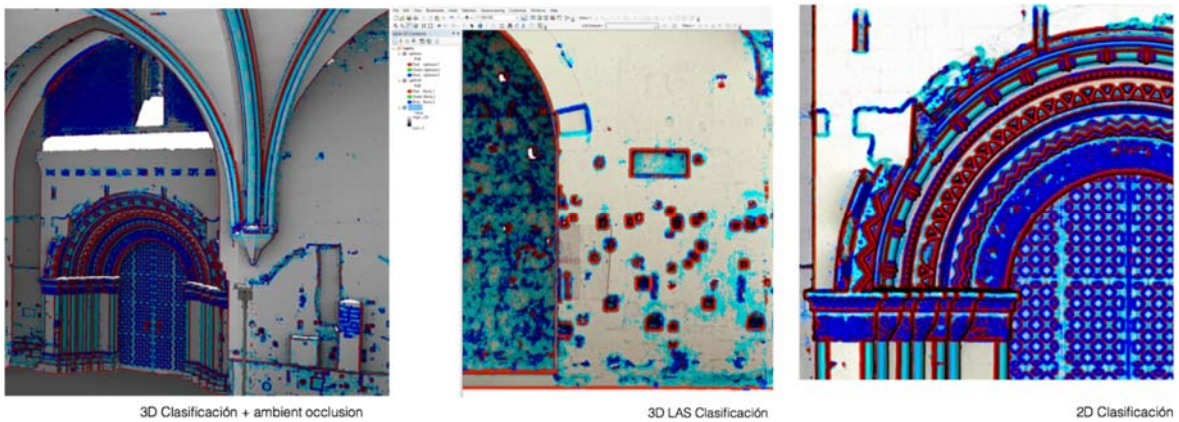
Ilustración 133: La Normal en 3D y en 2D



Fuente: Propia

- 3D. Es necesario filtrar las normales de los modelos 3D en relación a la continuidad de las superficies, siendo un proceso costoso en términos de calculando la resolución obtenida en un TLS.
- 2D.Se registra la normal en 2 direcciones y el tercer campo es para la rugosidad, que permite distinguir la superposición de elementos. La información de normales permite reducir el ruido o ausencia de información en los bordes de las imágenes.

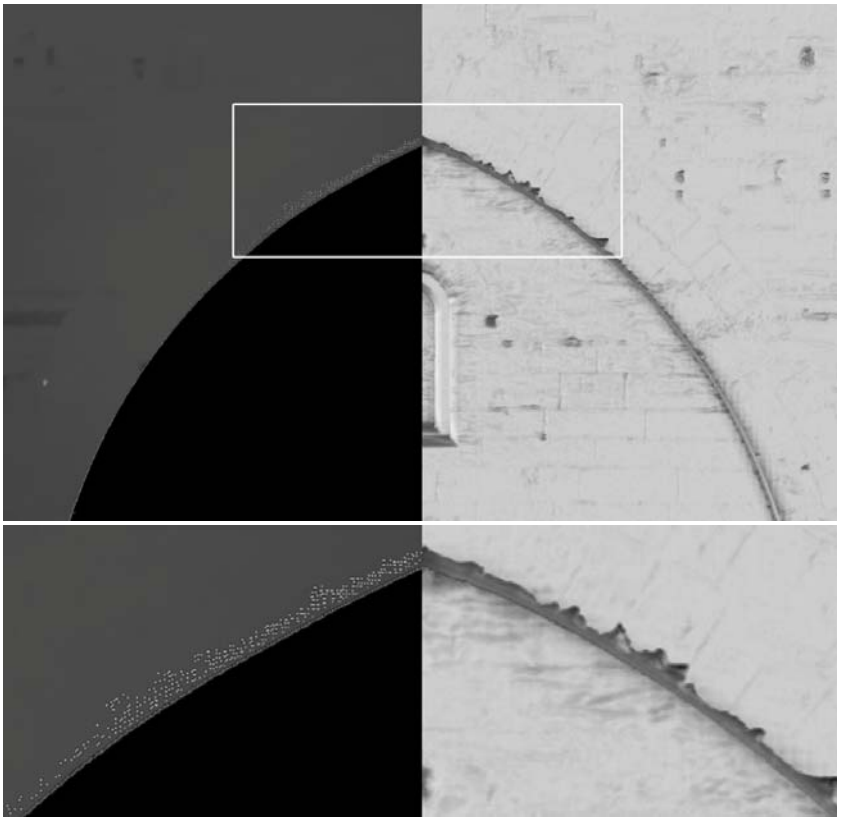
Ilustración 134: Clasificación e interpretación de la información en 3D y en 2D



Fuente: Propia

- 3D. La visualización en 3D facilita la interpretación de las formas geométricas. La extracción de datos requiere procesos de ingeniería inversa sobre la base de datos.
- 2D. La información esta sesgada en términos de volumen contemplando valores en X, Y y elevación.

Ilustración 135: Construcción de ráster en base a la normal, izquierda imagen de profundidades y derecha ráster de normales, al construirse a partir de la información de la normal se detallan mejor los bordes al promediar la superficie en relación a la dirección de esta.



Fuente: Propia

Zoom parte superior. Izquierda ráster con las direcciones de las normales, derecha Modelo Digital con un filtro de media. La comparación demuestra cómo se elimina el ruido del modelo digital en comparación con el modelo de normales.

5.3.4 Aplicación del levantamiento

La documentación generada se ha centrado en la documentación para el análisis de la arqueología en la arquitectura, y la documentación para el análisis del estado de conservación del edificio, desde el estudio de patologías hasta la cuantificación de los procesos que se realizarán sobre el bien.

> *"En principio veo utilidad para todas"* (las disciplinas relacionadas al patrimonio). *"Yo creo que es prácticamente* ***imprescindible entrar en arquitectura, escultura, patrimonio construido***. ***Es una herramienta fundamental en patrimonio construido****, de todos modos te agradezco que hagas esto, tenemos las herramientas pero nadie se pone a ello, generamos*

cosas, tenemos una nube de puntos brutal pero luego ¿qué quieres que haga con esto?. No vale solo la faena en bruto de elaboración, en este caso requiere de un mayor desarrollo. ***No sé si llamarlo trabajo, en tiempos absolutos de tiempo, pero sí que requiere un mayor desarrollo para ser mucho más positiva, porque aparte es muy fiel y por eso es transcendente****.* ***Tu trabajas poco con cosas que desaparecen; yo constantemente. Con lo cual, o lo hago muy bien, lo hago lo mejor que puedo, o lo que desaparece, desaparece.*** *Yo toco tanto cosas que desaparecen como que no, y esto para lo que desaparece es ideal."*

Entrevista Reinald Gonzàles (pregunta 3)

5.3.5 La arqueología en la arquitectura (Análisis estratigráfico)

La arquitectura y la arqueología están ligadas, esta relación es fundamental para comprender los procesos y cambios de los edificios históricos, entendiendo que el objeto construido a lo largo del tiempo es pluriestratificado y pluritipologizado (C. V. MILETO 2011), que es una fuente de información para la historia y para las disciplinas que tienen relación con este, teniendo un valor como documento histórico y como símbolo o signo.

Aunque la arqueología en la arquitectura parte de la estratigrafía arqueológica, es fundamental que esta se adapte a las características concretas de la arquitectura que se analiza, desarrollando métodos de investigación, comprensión y de relación que permitan profundizar en el bien patrimonial.

La base de estas metodologías desde el punto de vista de lectura y documentación del edificio se debe fundamentar en los procesos constructivos, partiendo del estudio de los materiales, en primer lugar diferenciando si son constructivos y decorativos, esta distinción requiere cierto grado de interpretación y de especialización, ya que al formarse igualmente por aparejos su clasificación automática se dificulta. La lectura de cada edificio es particular, desde el punto de vista del material por ejemplo pueden haber sido fabricados para el edificio o la construcción originaria o haber sido reutilizados.

"Con indiferencia del texto que le pongas a las cosas, lo acabas traduciendo en dibujo, *siempre. Cuando hacemos plantas, normalmente acabas levantándolas, con lo cual* ***siempre acabas levantando.*** *No sé qué me haría falta por que en cada caso, yo pienso que tienes que partir de uno mínimos, por ejemplo* ***me gustaría ver cómo puedes trabajar las identificaciones cronológicas de diferentes partes de paramentos. El médico ve una radiografía y ve cosas, yo veo esto y veo cosas, la cuestión es cómo grafiar eso sin alterar la calidad del dibujo" … "****por ejemplo* ***te puedo decir que realces el detalle del tapajuntas****, no es tanto un enfoque técnico, es según un enfoque"…. "Jugar con las luces, para detectar el tipo de trabajo del sillar, por ejemplo el medieval tiene dos o tres tipos de acabados, modificando como lo iluminas, ganas en definición cronológica, en definición material, desde un punto de vista arquitectónico, etc.,* ***pienso que es necesario, creo que es un trabajo de más gente, en cualquier caso da eso."***

Entrevista Reinald Gonzàles (pregunta 5)

La Unidad Estratigráfica se dividen en:

- **Volumétrica.**
- **Superficie, discontinuidad o interfaz; positiva** (cara del elemento, superficie de contacto, que en el edificio tienen mucha importancia por corresponder al paramento del muro o a la fachada del edificio) o negativa (corte de ruina, saneado); de etapas de obra, de uso y de estructuras. Los cortes pueden ocultar lagunas estratigráficas o vacíos erosiónales correspondientes a unidades estratigráficas perdidas.
- **De revestimiento**.

Las diferencias entre estratificación arqueológica y la estratificación arquitectónica permiten entender la complejidad de los estudios que se llevan a cabo en fachadas. En primer lugar en el caso del yacimiento arqueológico los estratos se deponen según las leyes de la gravedad, en una dirección, mientras que en la estratificación arquitectónica los estratos se estratifican en todas las direcciones, creando mayores dificultades para la interpretación del orden de deposición.

Por otra parte la investigación arqueológica contempla la progresiva eliminación (excavación) de los estratos presentes en el yacimiento, buscando capas de mayor antigüedad, al contrario que en el caso de la arquitectura, ya que no se contempla la eliminación de los estratos ya que cada estrato es parte del edificio actualmente existente.

Estos argumentos plantean la imposibilidad de leer en su totalidad las edificaciones patrimoniales, puesto que siempre existen partes ocultas. En consecuencia, muy difícilmente en arquitectura se podrá concluir o cerrar completamente una secuencia estratigráfica sin arriesgar peligrosas elucubraciones.

El registro estratigráfico se basa en levantamientos arquitectónicos, que aseguran una volumétrica a escala arquitectónica, sobre esta se identifican las unidades estratigráficas, usando para técnicas de Fotogrametría, o incluso fotografías en perspectiva.

La aplicación de este tipo de levantamiento permite volcar en el mismo soporte gráfico-fotográfico una gran cantidad de datos relacionados con diferentes niveles de observación, desde los más generales que atañen a las grandes masas de muros, hasta los referidos a las unidades estratigráficas, añadiendo, además, la información relativa a las relaciones, los materiales y técnicas constructivas y los tipos de superficies. Este tipo de representación ayuda a relacionar los datos para facilitar la posterior fase de interpretación de los mismos.

De esta segunda diferencia deriva el concepto de *legibilidad* de la arquitectura, según el cual, existen arquitecturas con diferentes niveles de legibilidad estratigráfica. No será prácticamente posible realizar una lectura estratigráfica de una arquitectura donde un enlucido continuo y homogéneo cubre completamente todos los paramentos, mientras que aumenta la legibilidad de la misma al aumentar el número de los paramentos descubiertos o la degradación de los enlucidos que permite identificar la superposición entre las diferentes fábricas o entre las fábricas y los estratos de revestimiento.

Existen además una serie de peculiaridades de la estratificación arquitectónica que derivan del empleo de determinados materiales y técnicas constructivas. De hecho, el éxito del estudio estratigráfico de la arquitectura está fuertemente ligado al conocimiento de los materiales y las técnicas constructivas. El proceso de construcción conlleva la formación de una serie de huellas debidas a las diferentes acciones que se verifican y es necesario conocer profundamente las

modalidades de construcción, o estratificación, para poder identificar correctamente las diferentes fases constructivas. Los materiales y las técnicas constructivas se relacionan de una forma específica según la puesta en obra y las herramientas de trabajo que dejan huellas interpretables sólo si se conocen previamente.

Las fábricas arquitectónicas poseen un diferente potencial de formación de las huellas estratigráficas en función del tipo de material empleado. El mortero, los enlucidos, las tapias, las fábricas de ladrillo, mampostería o sillería, los pavimentos de cerámica y todas las técnicas constructivas que prevén el empleo de materiales húmedos (materiales que adquieren fuerza en el momento del fraguado), crean un estrato compacto y continuo que, en el momento que se rompe, genera una cicatriz que difícilmente se puede disimular como en el caso de un sello de lacre.

Además, los materiales húmedos se adosan a los elementos preexistentes adaptándose a su forma como un calco, de manera que siempre es posible distinguir entre el elemento preexistente y el calco superpuesto y posterior. Gracias a estas dos propiedades en la mayoría de los casos se puede distinguir la parte de muro que se ha construido antes (el mortero del muro construido después se plasma sobre el muro preexistente), se identifican las demoliciones y reconstrucciones, se manifiestan la inserciones de elementos posteriores, etc.

Más compleja es la posibilidad de interpretar las fases constructivas en los materiales secos (madera, cañizos, paja, piedra en seco, etc.), es decir técnicas constructivas que no necesitan en su construcción del auxilio del mortero y que se basan en la yuxtaposición o en la conexión de piezas entre ellas.

5.3.6 Consideraciones para la restauración y conservación

Entender los materiales y la superficie de los elementos patrimoniales cobra especial interés desde el punto de vista histórico, al igual que en los procesos de conservación, esta necesidad es evidente en las diferentes publicaciones que estudian la arqueología en la arquitectura (C. V. MILETO 2011), que relacionan los método usados en la arqueología a los estudio de los edificios.

> ***"Toda la gente involucrada en restauración.*** *Donde aplicar estas técnicas directamente es en* ***control de limpiezas****, cuando se hace la limpieza del edificio es organoléptica, es decir está más limpio o está más sucio, en la cual pueda comparar la piedra antes de limpiarla y después, vas viendo la evolución, ¿hasta dónde puedo limpiar?* ***Todo lo que es calcular lo puedes hacer a priori, no solo un material de soporte sino que puedes calcular costes."***
>
> *Entrevista Antonia Navarro (pregunta 3)*

Qué acciones a desarrollar para valorar el conjunto arquitectónico.

- Levantamiento de planos
- Reconocimiento de los procesos constructivos
- Análisis del estado de la obra escultórica
- Análisis del estado actual de las diferentes intervenciones efectuadas sobre el bien patrimonial.
- Identificar patologías, evaluar el estado de conservación de la piedra

- Verificar el estado de conservación de la piedra, reconocer y documentar las últimas intervenciones preventivas, como lo es la limpieza de la fachada, la eliminación de superficies de los sillares degradados y las descamaciones de la descomposición de la piedra.
- Realización de una documental fotográfica

Ilustración 136: Efectos de alteración en la piedra (“mal de la piedra”)

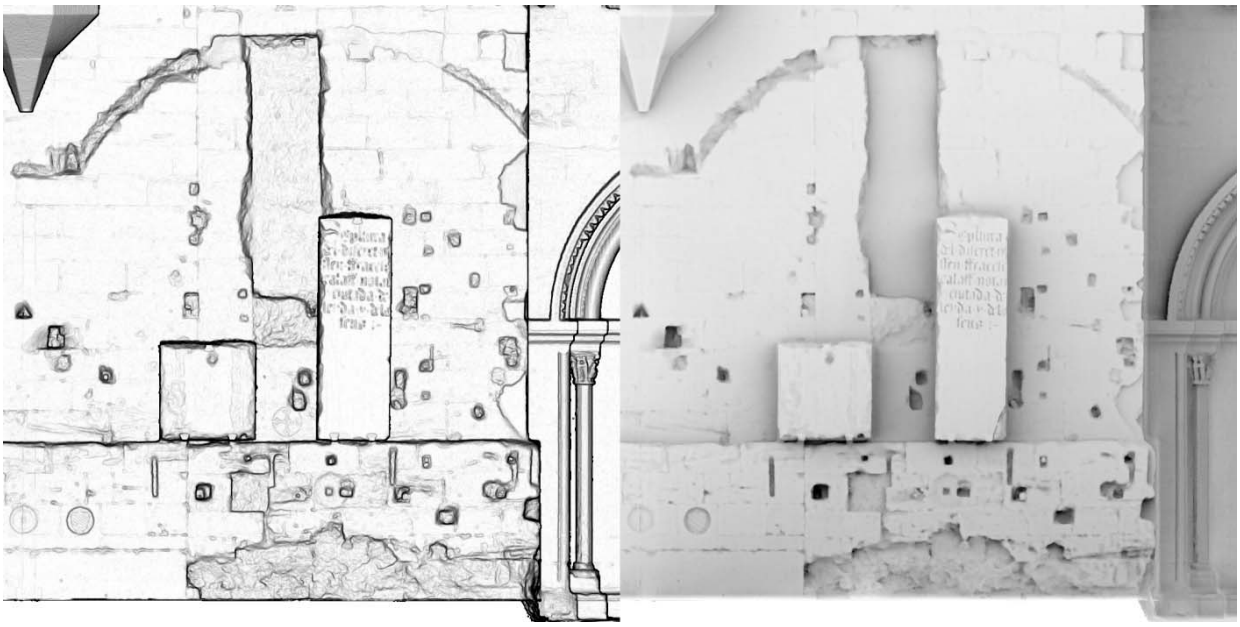
A **B** **C**

A) Alveolización de una caliza. B) Erosión (por disgregación) de una arenisca. C) Disgregación en areniscas.

Fuente: (HIGUERAS s.f.)

Arenización y disgregación: Normalmente son procesos superficiales, en los cuales hay una pérdida de material diferencial, Ilustración 137. “La arenización es característica de los granitos, y se debe a la meteorización de los feldespatos para dar minerales arcillosos, que son eliminados con facilidad, quedando sueltos los granos de cuarzo; la disgregación es típica de las areniscas, por disolución del cemento carbonatado o pérdida de la matriz arcillosa, lo que libera los granos” (PANCORBO 2010).

Ilustración 137: Análisis de pendientes e iluminación en la identificación de la erosión de la piedra.



Fuente: Propia

Alveolización de los materiales (VALDEÓN 1985): Es un fenómeno caracterizado por la formación de huecos o cavidades de diferentes tamaños y morfologías (llamados alveolos). Su aparición depende de la composición de la roca (como por ejemplo calcita o yeso) y de factores ambientales (como puede ser el viento cargado de partículas o raíces de plantas). Es relativamente común en areniscas, cemento carbonatado, o en rocas porosas.

Ilustración 138: Documentación como herramienta para contrastar la porosidad de los materiales. Ejemplo de alveolización de la piedra en un muro interior.

Fuente: Propia

Ilustración 139: Identificación de diferentes materiales. Probablemente se han perdido bloques completos, que ha habido que reponer con materiales similares.

Fuente: Propia

*"**Como siempre partimos en dos dimensiones, pues la foto de color, con carta de color.** No veo mucha cosa en la nube de puntos en tres dimensiones, en cambio en la imagen ortogonal si, necesitaría el color con el relieve, es más importante para mí el relieve, pero debe ir acompañado con el color y la imagen de contornos, para poder saber que esta*

adelante y atrás. La información es mejor de forma individual, las imágenes por separado, porque al combinarlas hace que imagine cosas, que por separado no las veo, que la operación entre imágenes las haga cada usuario, pero que se puedan hacer".

Entrevista con Antonia

Sillería: La arquitectura de fábrica de sillería representa la aristocracia del edificio. Las dimensiones de la obra y el aspecto plástico son dos cosa íntimamente ligadas, que deben tenerse en cuenta al dibujar los despieces de los diferentes momentos de la obra. Por ejemplo, aunque en la edad media las juntas eran consideradas un defecto inevitable, las construcciones Romanas, renacentistas y Helénicas se inspiran en ellas, consiguiendo diferentes apariencias para los muros, como lo son las Almohadillados, como ocurre en la fachada del Palacio de Carlos V de Granada.

El tamaño del sillar es generalmente grande, requiriendo un sistema mecánico para su colocación, ya que su peso no permite una manipulación directa.

Los sillares se pueden dividir en dos, de apoyo, cuando se encargan de repartir las fábricas subyacentes, o sillares de esquina, cuando el sillar tiene dos caras acabadas según la forma que corresponda al aparejo de la esquina.

Mantenimiento de los sillares:

- Roturas estructurales de las aristas.
- Agujeros abiertos en las fachadas, que pueden ser remplazados con un nuevo sillar. Para ello se debería tener en cuenta las características geológicas de la piedra y la colocación de elementos equivalentes, haciendo un contraste equilibrado con la obra original.
- Cuando hay pérdida de parte del volumen o erosión de la piedra, se procede a la consolidación de la piedra, como por ejemplo con la aplicación de morteros de reposición. Igualmente se debe documentar esta erosión o perdida de material, para su control.
- Rehabilitaciones anteriores con diferencias significativas de material en relación a la obra, pueden requerir tratamientos que homogenicen el acabado de la piedra.

"Los levantamientos en 2D son lo más utilizado en restauración. *Se realizaría una primera toma de* ***información sobre papel para luego volcarla al ordenador*** *con un programa informático adecuado para añadir la información obtenida.* ***Esta información se puede complementar con un levantamiento en 3D para completar la información no conseguida con el 2D."***

Entrevista Elena Urueña (pregunta 4)

5.3.7 Planos vectoriales

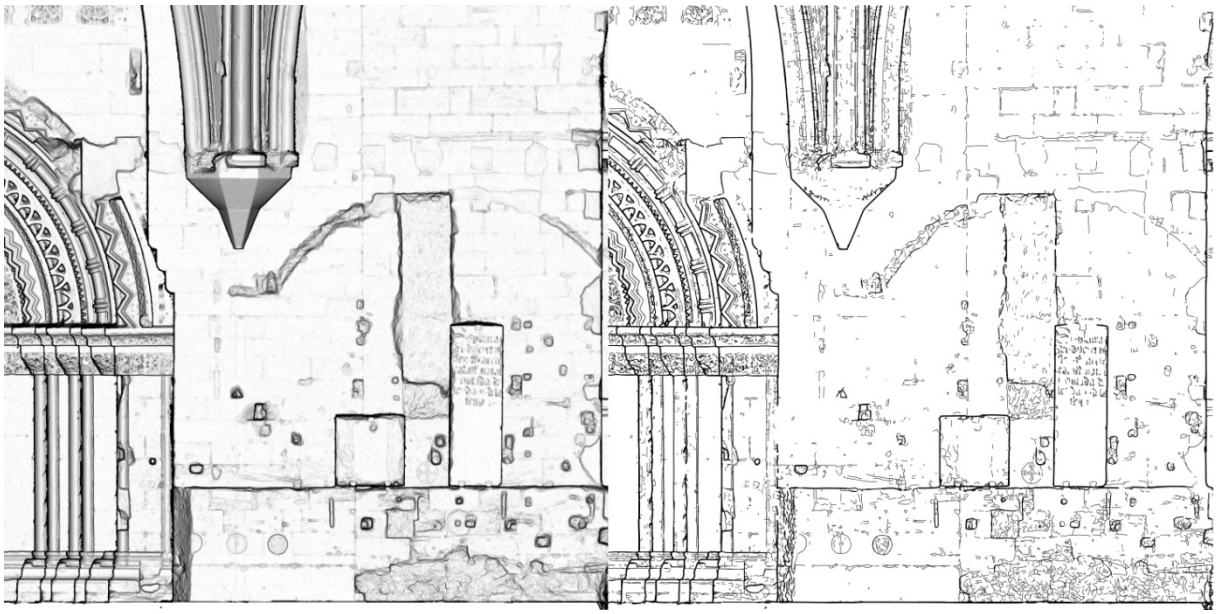
A partir de las entrevistas encontramos la necesidad de continuar la conversión de los datos a formatos vectoriales, utilizando los datos ráster como una herramienta y un complemento de planos vectoriales.

"Estoy acostumbrado a trabajar con dibujos vectoriales, porque son más fáciles de reelaborar. *Pienso que aunque el software realizara el trabajo automático de dibujar las líneas, quedaría un segundo trabajo que es del experto de dar la clasificación, por decirlo de*

alguna manera, en capas, es una labor bastante más sencilla que todo el proceso de generar las líneas…. de tal manera, que yo hago la restitución, el análisis y la selección de líneas, pero otra información como ***el color y la textura la añado como un fotoplano, puesto detrás del dibujo vectorial****, es un documento que para mí es muy válido, porque la orto foto puede estar en una capa, que elimino del dibujo y añado otras* ***capas que son de interpretación, por ejemplo histórica o de años, etc."***

Entrevista Antonio Almagro Gorbea (pregunta 2)

Ilustración 140: Dibujos vectoriales a partir de los ráster de curvatura TLS



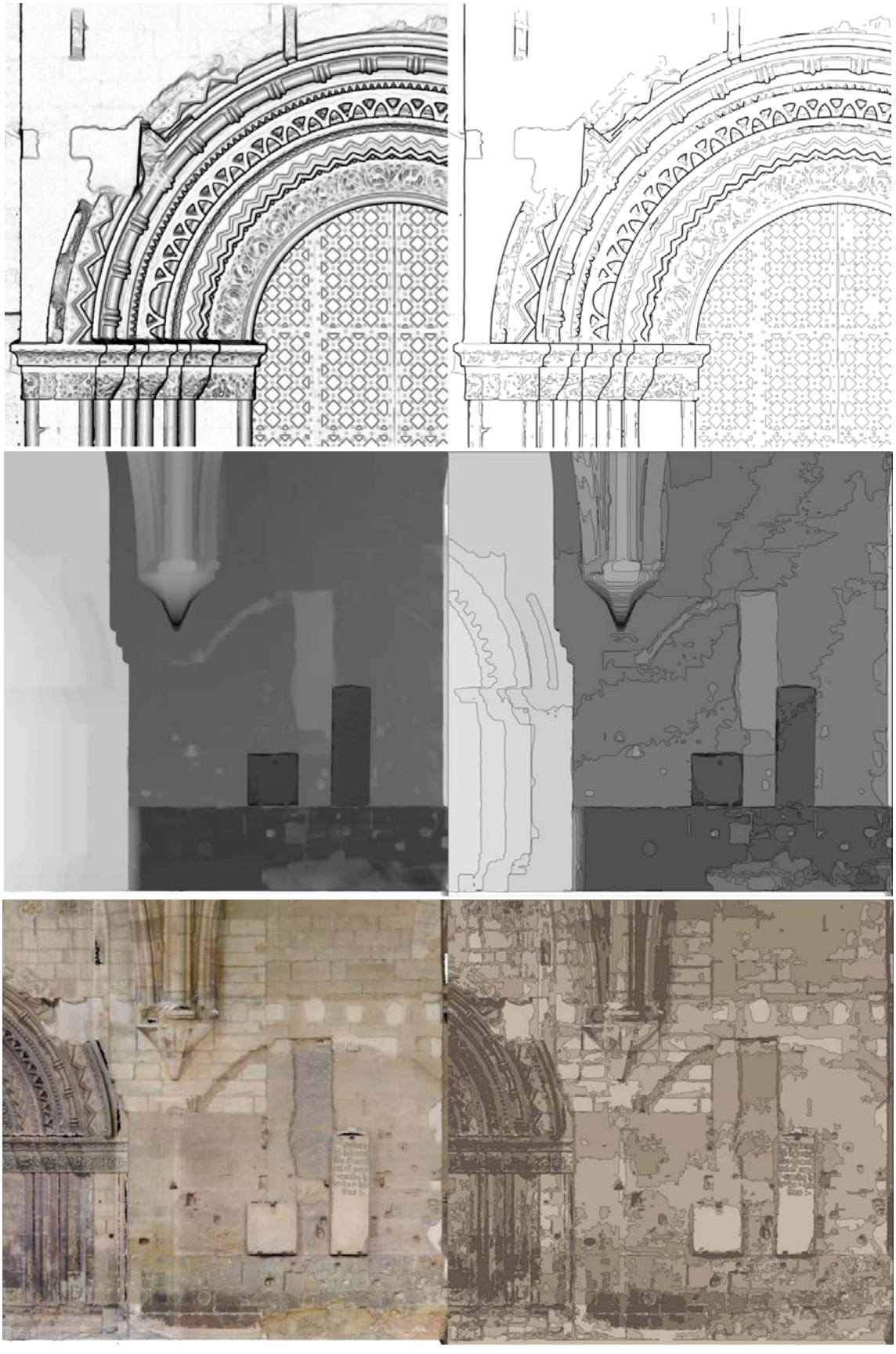
Fuente: Propia

Cada línea debe corresponder a un borde de un elemento en la realidad, que debe ser visible a la escala que se imprima. Ello quiere decir que la información TLS convertida a vectores puede llegar a una escala determinada por la resolución del escaneo y las limitantes del instrumento.

"Yo empezaría a trabajar con la información que me permitiría generar el dibujo vectorial*, porque es una información más de síntesis, que permitiría el entendimiento más primario del edificio, después la información de color, ayuda a entender los problemas de materiales e información que ayude a entender lesiones, luego ya aquellos procesos que son más complejos de filtrado y de generación de otros tipos de informaciones."*

Entrevista Antonio Almagro Gorbea (pregunta 6)

Ilustración 141: De planos ráster a planos vectoriales



Fuente: Propia

El siguiente paso sería la edición manual de estos vectores, relacionando a capas, que permitan mejorar su interpretación, en algunos casos complementado los planos, o simplificando, siempre en función de la escala con la cual se ha trabajado, en este caso en relación a la resolución que máxima que nos permitió el escáner láser y la metodología utilizada.

> *"En general* ***pueden serlo en todos los campos,*** *porque la intervención en el patrimonio, requiere de una información preliminar que tiene que ser gráfica, tanto para la generación de esos dibujos de base, que yo* ***creo que donde habéis llegado a conseguir el dibujo vectorial de forma semiautomática el paso no sea difícil, pero también pienso que desde luego las orto fotos son válidas…*** *piedras que tienen una textura distinta, la determinación digamos automática de diferentes texturas de un mismo material, todo eso son fuentes de información,* ***que habrá que ver para cada caso para que puede servir, pero en principio es fuente de información."***
>
> *Entrevista Antonio Almagro Gorbea (pregunta 3)*

En este proceso de organización de capas e interpretación tenemos que tener en cuenta el valor de las líneas, en cuanto a expresión gráfica. En las cuales debemos tener en cuenta que el valor de línea en los medios digitales se define por capas, en las publicaciones de (CRAMER 1986) (A. ALMAGRO 2004) estas capas se reducen a:

- *"SECCIÓN: Las líneas de esta capa marcan la separación entre hueco y macizo o en todo caso, entre espacio accesible y el que no lo es.*
- *PROYECCION DELANTERA: Las líneas de esta capa marcan aristas que definen bordes de plano que están situados delante del plano de proyección.*
- *PROYECCION TRASERA: Las líneas de esta capa marcan aristas que definen bordes de plano que están situados detrás del plano de proyección. (p.e. en una planta, proyección de arcos y bóvedas).*
- *APAREJO: Las líneas representadas en esta capa corresponden a bordes que no constituyen aristas o límites de planos, como pueden ser las juntas de aparejos.*
- *DECORACIÓN: las líneas de esta capa corresponden a elementos con aristas vivas pero que pueden considerarse de un segundo orden y que por tanto pueden ser ocultadas o impresas con línea más fina para evitar empastar el dibujo.*
- *LESIONES: Corresponde a líneas no sustanciales a la propia arquitectura, fruto del deterioro y que se imprimirán o no según las necesidades.*
- *TRAMA: Capa que contiene las tramas, generalmente que determinan las zonas macizas.*
- *AUXILIAR: Capa para líneas auxiliares que no se imprimen (p.e. contornos de tramas en los límites indefinidos).*

En algunos casos se han utilizados otras capas adicionales como Carpintería, Cerrajería, etc. según las características del edificio y las posibles aplicaciones del dibujo" **Fuente:** (CRAMER 1986) (A. ALMAGRO 2004).

En todo caso este proceso de edición, organización o valor de línea depende del objetivo y método de trabajo, que puede variar entre los diversos estudios que se pueden hacer del edificio.

> ***"El problema sería saber si yo puedo generar manipular esta información,*** *por si existirá un software o una metodología de manejo de software que me permita hacerlo, o si yo tenga que* ***depender de una persona que haga estas imágenes****.* ***Hay mucho patrimonio que***

tenemos que intervenir con una gran limitación de medios. *Si yo necesitara la instrumentación, de la cual también dispongo, que es* ***mucho más complejo de manejo, pues no la puedo aplicar a todo, en qué punto, para hacer este trabajo puedo utilizar un especialista, o puedo utilizar una metodología o unos instrumentos que unas personas no*** *especialistas lo puedan utilizar."*

Entrevista Antonio Almagro Gorbea (pregunta 7)

*"Una fundamental, y es la capacidad técnica de la persona que lo va a trabajar. Yo he trabajado con nubes de puntos y he sufrido muchísimo. Los procesos gráficos que tu generas pesan mucho, necesitan un proce****so de asimilación muy alto el cual conseguirlo necesita una inversión muy grande de tiempo. Problema de disciplinas, dejar tanta carga de información, sin poder jugar con ella, me refiero interrogarla, moverme, me resulta extremadamente complicado.*** *Me parece interesantísimo, sobre todo por el punto de racionalización."*

Entrevista Reinald Gonzàles (pregunta 7)

5.3.8 Conclusiones

En el desarrollo de la tesis quedo en evidencia la posibilidad que tiene el trasladar las características geométricas de las superficies de modelos en tres dimensiones, a modelos ráster en dos dimensiones, que también pueden incluir información de profundidad. Logrando resaltar o ampliar características concretas de las mismas.

Estas imágenes ráster son fruto de procesos aplicados en diferentes disciplinas, como lo son los procesos topográficos o técnicas de iluminación sobre la superficie, permiten una reinterpretación de características en tres dimensiones de las nubes de puntos TLS, por medio de a imágenes en 2D y 2.5D, hasta tal punto, que se logra identificar de forma ágil los límites de los elementos que conforman una fachada, las alteraciones de la superficie, al interpretar los relieves o hendiduras de estas.

Ello permite tener una visión global en cuanto a las propiedades de las superficies, al poder analizar en un mismo documento diferentes zonas desdobladas, compararlas entre sí, y relacionarla con otras informaciones, de este modo se permite sobrepasar la variante del color en la planimetría, extendiendo la documentación en planos a la variante geométrica, con ello no solo se logra por ejemplo ver un sello, sino documentar el relieve del mismo, almacenar esta información, para ser comparada en futuros estudios.

El profundizar la variante RGB de la ortofoto, permite que en una capa se interprete el cambio de material por color, y en otra se pueda ver si hay un cambio en la porosidad de la superficie, o en la degradación de las juntas, con ello se llega a una interpretación o conclusiones de las fachadas estudiadas, basada en una documentación fiable y a reducir el grado de interpretación o de deficiencias en la representación de las mismas, al partir de informaciones directas del levantamiento que pueden ser constatadas en todo momento.

Esta comparación de detalles de relieve de la superficie y otras capas, han dejado a la vista puntos clave donde el material cambia, permite diferenciar tipos de piedra en una misma superficie, al

disponer de un mayor conocimiento de estas, al integrar mapas de la superficie iluminada artificialmente (con técnicas de oclusión ambiental o por iluminación sobre la superficie desde un punto relativo), con otros mapas como los de análisis de curvatura o de clasificación de las superficies geométricas, teniendo en cuenta que esta visión global desde una vista ortogonal de fachada tiene que ser comprobada en sitio y relacionada con una representación del mismo punto de vista en 3D, para lograr una mejor comprensión a la hora de explicar los elementos analizados.

Estos procesos de iluminación artificial han servido al mismo tiempo para realzar los efectos de alteraciones de la piedra, del caso de estudio, como por ejemplo la erosión y disgregación del material. Como punto de partida para que expertos en restauración o en interpretación del patrimonio, realizar una lectura histórica (arqueológica) de las fachadas y puedan intervenir en el bien patrimonial, utilizar dicha información, o complementarla con estudios posteriores. Siendo un trabajo que requiere que se involucren más disciplinas, tanto la técnica que amplié la información, como la especializada en patrimonio que direcciones y amplié dicho conocimiento, mediante las herramientas adecuadas para tal fin.

Complementario a estos aportes directos del caso de estudio, se realizó una serie de entrevistas, para medir el potencial de estas técnicas, siendo validadas las síntesis realizadas en modelos, como imágenes ráster, por parte de expertos en campos relacionados con el patrimonio. A tal punto que se planteó la necesidad de convertir dicha información en planos vectoriales de forma automática, como una aproximación automática, que requerirá la interpretación de un experto, que aislara las líneas a capas específicas y completará o corregirá puntos específicos. En este proceso de conversión se identificó la limitante, en relación a los vacíos de información, las oclusiones producidas por la misma superficie o por la altura desde la cual se escaneo, generan planos en pendientes que no permiten identificar correctamente el borde de dichos elementos de forma automática, aun así un usuario puede identificar en las imágenes ráster dichos bordes, al comprender la geometría de la superficie y completar estas líneas que faltarían en el dibujo vectorial.

5.4 Conclusiones de las entrevistas

5.4.1 Introducción

Cada uno de los entrevistados realizo un énfasis en sus especialidades y cómo utilizarían la información de un levantamiento TLS en su trabajo cotidiano, en todas las encuestas se plantea el uso de planos ráster - vectoriales y la utilización de imágenes isométricas o en perspectiva. En ninguna de las encuestas se planteó la utilización directa de la información en tres dimensiones, dejando en evidencia sus limitantes técnicas, a la hora de manejar estas bases de datos, desde sus conocimientos previos.

Algunos de los encuestados han considerado una limitante el necesitar el apoyo de un personal especializado para la utilización de dicho material, al querer abarcar desde sus grupos de trabajo el proceso entero, de estudio, conservación o difusión, dejando a un lado algunas técnicas de los levantamientos, que permitirían profundizar la comprensión del bien patrimonial que se analiza.

Consideramos que es importante incluir nuevas técnicas de documentación y análisis del patrimonio, no como un proceso estático, sino como un proceso continuo, que requerirá la implicación de nuevas

técnicas y puntos de vista, en cierto grado requerirá el procesamiento de una persona acostumbrada a utilizar estos datos, pero siempre guiado del especialista, que quiere realizar o profundizar en características concretas del bien, siendo la síntesis del trabajo una base, que permitirá nuevas aproximaciones.

También entonemos que se debe incluir esta formación para reforzar la educación en el ámbito de levantamientos arquitectónicos, que permitan desde la base del trabajo interdisciplinar, incluir estas tecnologías, en la documentación, gestión y difusión del patrimonio. En el cual los arquitectos deben fortalecer este dialogo entre disciplinas, al tener una visión global de los proyectos.

Por ello en el ámbito educativo es necesario aportar herramientas que permitan una mejor gestión de las bases de datos TLS, y profundizar estos puntos en el proceso de enseñanza, ya que aunque los programas convencionales (ejemplo los de autodesk 2014 en adelante) se están adaptando a estos formatos, siguen existiendo limitantes en algunos procesos, especialmente cuando nos referimos al tamaño de los archivos y a las técnicas de ingeniería inversa.

El problema de los tamaños de los archivos se debe a que no todos los programas usados en los ámbitos académicos gestionan bien las nubes de puntos en 3D, convirtiéndose este nivel de detalle en un problema, en lugar de una fortaleza, o un potencial, que permita una mayor exploración de los levantamientos.

También encontramos las mismas limitantes con el manejo de mallas, ya que los programas usados en levantamientos normalmente no tiene procesos de ingeniería inversa adecuados, que permitan generar mallas de alta resolución y posteriormente su conversión en modelos reducidos, por medio de por ejemplo técnicas de decimación o detección de contornos o geometrías básicas. Por lo cual la construcción de modelos a partir de nubes de puntos suele ser una limitante, y solo se utilizan las nubes de puntos decimadas como herramienta de relación entre modelos levantados a partir de planos en 2D, o procesos paralelos que reducen la precisión de los modelos.

A continuación resumiremos las principales aportaciones que se han dado en cada una de las preguntas de la encuesta.

1 Diferencies entre la información de levantamientos 2D y 3D de los casos expuestos:

- *Existe una necesidad clara de contrastar de forma directa la información en dos dimensiones con modelos en tres dimensiones, para comprender los bienes patrimoniales desde otro punto de vista, explicar temas específicos en los trabajos desarrollados, y ahorrar tiempo en trabajo de campo.*
- *Siendo la manipulación de estos modelos en tres dimensiones una limitante, principalmente por la complejidad de su uso y explotación.*
- *Es interesante destacar que esta limitante se reduce cuando el material desarrollado tiene el mismo punto de vista como imagen en 3D que en 2D, permitiendo generar un discurso de ida y de vuelta, es decir, si se amplía una característica concreta en una imagen mediante procesamiento de imagen, siempre es conveniente anexar una vista homologa de la nube de puntos en tres dimensiones, permitiendo un mayor entendimiento del enfoque que se quiere plasmar.*

- *Destaca la necesidad de poder cuantificar zonas o volúmenes, con rigor, como paso previo a las intervenciones, tanto en términos cualitativos, como en relación a la valoración de los trabajos a realizar.*
- Ambas aportan informaciones similares, la diferencia es que el modelo 2D es más fácil, más asequible, más intuitivo, y el modelo 3D exige una capacidad de manejar el visor, el elemento para orientarte ortogonalmente, isométricamente, en cambio un 2D es un 2D, es básico.

2 ¿Qué aplicación desarrollaría basándose en los ejercicios expuestos?

- *Se plantea la necedad de un método de levantamiento riguroso en todos los proyectos desarrollados, destacando la carga de fidelidad de los ejercicios ejemplificados.*
- *Destaca la variedad de informaciones conseguidas, partiendo del levantamiento con escáner Láser Terrestre, como una base que ayuda a interpretar.*
- *De las informaciones aportadas destaca el relieve de las superficies, como información útil en la interpretación del bien patrimonial.*
- *Las aplicaciones planteadas comienzan con el levantamiento a partir de planos, todas las entrevistas coincidieron en la importancia de la información vectorial a partir de la información presentada, ya que para ellos es la herramienta más fácil de utilizar, no siempre con programas CAD, también con el uso de otros programas de vectorización.*
- *Se suelen utiliza de forma complementaria capas ráster, que se ponen detrás del dibujo vectorial, como capas de interpretación, ejemplo histórica o de años, etc.*
- *Desde el punto de vista de la restauración, las aplicaciones varían con respecto al proyecto a ejecutar, desde llevar un registro del cambios, control de daños, control de limpieza, la medición y zonificación fiable, el control de su evolución de un deterioro, generar presupuestos detallados de futuras intervenciones, la documentación del estado de conservación, ser una base fiable para presupuestar las actuaciones a realizar, ayuda a identificar materiales o tipos de piedra, etc.*
- *Desde la educación en levantamientos, la gestión del modelo 3D tiene más interés y potencial de datos, yendo del todo a menos información y analizar modelos en otros procesos. Mientras que al partir de la información 2D solo se ve una parte de la información, que en principio otra persona ya ha hecho, permitiendo una menor explotación de los datos del levantamiento en 3D.*

3 ¿En qué campos o disciplinas relacionadas al patrimonio sería útil las técnicas explicadas?

- *En todos los campos relacionados al patrimonio, conservación y restauración, ya que la información preliminar tiene que ser gráfica.*
- *Es necesario delimitar para que puede servir cada ráster generado, aunque en principio se entienden que son fuente de información valida. Para ello es necesaria la colaboración entre las disciplinas involucradas, con enfoques específicos.*
- *Cada profesional extraerá un tipo de información de la misma, según sus conocimientos y según la finalidad que quiera darle a esta información.*
- *Esta información es muy útil para documentar el patrimonio que desaparece.*

- *En el registro, documentación y análisis de edificios, desde el punto de vista de volumetría, desde el punto de vista de cromático, así como desde lo que sería patología.*

4 ¿Cuál cree que es la forma más práctica para manipular esta información desde su campo de estudio?

- *En las entrevistas quedo claro que las informaciones generadas son elocuentes y útiles.*
- *La aplicación de procesos de filtrado para casos de estudio concretos debe ser objeto de un intercambio de ideas e informaciones, de forma extensa entre las disciplinas involucradas.*
- *La información en 2D es la base que permite trabajar.*
- *En trabajo de campo se suele manejar material impreso, que luego se traslada como información digital.*
- *La información en 2D no se debería desligar a la información en 3D, ya que se pierden cantidades ingentes de información del trabajo desarrollado. El material en 3D ayuda a explicar los trabajos desarrollados.*
- *Nubes o mallas 3D optimizadas, que pesen poco y se permita su fácil manipulación en programas convencionales, requiriendo para ello procesos de interpretación y toma de decisiones para su desarrollo.*

5 ¿Qué material complementario usaría con el material expuesto?

- *Informaciones obtenidas manualmente, el análisis de paramentos, análisis arqueológico, para tratar de ver el proceso constructivo, o el proceso de alteración, entendido como un proceso histórico.*
- *Existe la necesidad de graficar detalles específicos, en relación al campo de estudio que se enfoque el trabajo, en los que se pueda realzar detalles a partir de los métodos expuestos.*
- *Informaciones obtenidas por otros sensores, como la termografía en relación a la temperatura de los materiales o su asociación con humedades.*
- *Imágenes térmicas, de resonancias acústicas, sonar, para discutir materiales, buenas fotografías, tomadas en condiciones de luz adecuadas y optimizadas.*
- *Referencias topográficas precisas, ayudaría mucho, una medida exacta de una esquina es vital.*

6 Desde el punto de vista metodológico y partiendo de la base expuesta, ¿con que información comenzaría a trabajar?

- *Parten de la información que permite hacer el plano vectorial, al ser una información de síntesis, después información fotográfica (con carta de color), para contar con información de textura y color, para entender las lesiones, y luego las imágenes que se generaron con procesos de filtrado como informaciones complementarias.*
- *El relieve de las superficies complementa la información de color, para distinguir los cambios geométricos o de textura de las superficies.*

- *Se plantea la necesidad de establecer un discurso entre el plano en 2D y los modelos en 3D, como un producto intelectual, que permita dar a entender enfoques específicos del bien.*
- *En trabajo de campo es fundamental contar con un levantamiento como material impreso a escala, sobre el cual trabajar.*
- *Se contempla no tener un producto final, si no tener un producto que genere un montón de productos finales, dada la complejidad y la variedad de disciplinas que engloban a los edificios patrimoniales.*
- *Una buena orto fotografía frontal, bien iluminada con contraste y unas medidas topográficas.*

7 ¿Qué limitantes encuentra en el uso de esta información?

- *Con el manejo de nubes de puntos existe una limitante en la capacidad técnica de la persona que va a explotar la información. Necesitan un proceso de asimilación muy alto, para la cual se necesita una inversión muy grande de tiempo, de instrumentos y de especialización.*
- *Las personas entrevistadas trabajan sobreponiendo imágenes fotográficas a planos vectoriales, pero no suelen trabajar operando o cruzando informaciones ráster, siendo esta manipulación un proceso nuevo para el desarrollo de sus proyectos.*
- *Depender de una persona que haga las imágenes.*
- *Las limitaciones económicas que tienen la mayoría de edificios patrimoniales, no permiten levantamientos con este grado de detalle, comenzando por el hecho de realizar un levantamiento con un láser escáner.*
- *La principal limitante probablemente el tamaño, de los ficheros, o el exceso de información, que no los hacen gestionables de manera simple. Un problema de exceso. Una estrategia es fragmentarlo en partes, que encajasen exactamente y poder hacer el análisis por partes.*

Capítulo 6. CONCLUSIONES

La principal motivación de esta tesis es la búsqueda de un vínculo entre las personas involucradas en la conservación del patrimonio, utilizando para ello la documentación y el análisis del levantamiento, como punto de unión entre diferentes visiones, generando metodologías y herramientas que permiten un mayor entendimiento del carácter patrimonial de los casos estudiados.

Como bien se ha dicho, la protección y valorización del patrimonio requiere la intervención de diferentes disciplinas y enfoques, actuando en edificios complejos, a los que cabe incluir el paso de los años y sus intervenciones, por lo cual su análisis depende directamente del estado de conservación del edificio en periodos determinados.

Siendo fundamental el rigor métrico, la precisión y la fiabilidad de la información de partida, con un objetivo común el **ampliar el conocimiento del bien patrimonial**

Este conocimiento comienza con el estudio del estado actual, de la forma real del edificio, sobre la cual posteriormente se pueden realizar trabajos de representación teórica, de restitución, o su evolución histórica. Esta documentación hace que la representación de dicho análisis o estudios de estos edificios sea aún más compleja, siendo indispensable partir de información con rigor, tanto en la base como en su posterior desarrollo.

La metodologías propuestas en esta tesis buscan enfatizar estos principios, generando lenguajes a partir de una documentación gráfica común, rompiendo los preconceptos de que solo la documentación arquitectónica puede ser instrumental, ampliando así el uso instrumental a otras disciplinas, específicamente la introducción de la tecnología de Láser Escáner Terrestre al estudio y registro de los revestimientos de los materiales, de las tipologías de degradado, de la consolidación de los materiales, al análisis de movimientos o deformaciones de las fachadas, o a los procesos de estratificación arqueológica, entre otros.

Las técnicas de documentación en restauración y arqueología se consideran procesos manuales visuales "*naked eye*", **en esta tesis ha quedado en relieve que se pueden utilizar técnicas TLS para el análisis geométrico de las superficies y la integración con otras bases de datos**, que permiten profundizar de forma sistemática en estudios concretos del patrimonio.

Desde el punto de vista de la restauración se repite el mismo fenómeno, que reafirma la aportación de las metodologías desarrolladas para reducir los procesos manuales. En restauración, la detección de la degradación del material en edificios históricos con métodos tradicionales como el mapeo manual, o el análisis a simple vista por parte de un experto, se consideran procedimientos laboriosos, poco eficientes en relación al tiempo que requieren.

Como punto de partida en común de estos procesos, encontramos el levantamiento arquitectónico, puesto que todos los campos relacionados con el patrimonio, conservación y restauración **parten de esta información preliminar de carácter gráfico,** pasando por el análisis, la selección y la síntesis de problemáticas específicas en el proceso de evaluación, de toma de decisiones, de documentación, o la simple difusión de características concretas del patrimonio.

Las aportaciones de las metodologías y casos de estudios planteados se pueden resumir en los apartados que siguen a continuación, entendiendo como su fin último el de generar herramientas que

permitan ampliar y relacionar el extenso conocimiento del patrimonio a partir del levantamiento arquitectónico (levantamiento arquitectónico = análisis + selección + síntesis):

Analizar, recopilar:

- **Mayor conocimiento de los instrumentos TLS.** Es necesario conocer las limitantes técnicas de los instrumentos TLS, para establecer un plan de trabajos que contemple dichas restricciones, tanto de forma general (2.3.2.3 Análisis del error TLS), como de limitantes específicas de los instrumentos.
- **Se han establecido criterios básicos a tener en cuenta en los levantamientos.** Recopilando información de estándares internacionales y propuestas metodológicas de levantamiento TLS, concluyendo en principios que se deben sopesar a la hora de planificar y evaluar un proyecto TLS.
- **Base de datos fiable, cuando no es posible repetir el levantamiento.** La información generada cobra especial interés en la documentación del patrimonio que tiende a desaparecer.
- **Identificar la importancia de la Información TLS en el trabajo de campo.** En las entrevistas se constató que el material generado puede reducir tiempos, también se hizo relevancia en el hecho de que es fundamental un levantamiento impreso a escala para el trabajo de campo, sobre el cual trabajar.
- **Rápida obtención de datos relevantes**, para los involucrados en la conservación patrimonial y para la identificación de la pérdida de valor del elemento patrimonial por su degradación, estableciendo metodologías que permitan medir el deterioro del mismo con el paso del tiempo.
- **Unión entre posiciones.** Se realizó una extensa investigación de técnicas de unión entre posiciones TLS, con ejercicios propios que explicaban las propiedades de cada técnica, sus limitantes y las diferencias en cuanto a detección de características que permiten relacionar posiciones, útiles para otros procesos, como la comparación de nueves de puntos, mallas o grids o por ejemplo la detección de objetos. Complementario a ello se concluyó con consideraciones a tener en cuenta a nivel de usuario, para optimizar los procesos de uniones de posiciones TLS especialmente con el método *Iterative Closest Point* ICP (2.5.4 Precisión y exactitud alcanzada. Rendimiento alcanzado).
- **Corrección color e intensidad entre panoramas.** Una de las principales limitantes en cuanto a homogeneidad de posiciones TLS con color es el cruzar los panoramas en las nubes de puntos. Por ello, se ha enfatizado en los puntos clave que permite el tratamiento de los panoramas, de forma individual por foto y entre panoramas, teniendo en cuenta la escala de trabajo, factores ambientales y el uso de técnicas fotografías como el HDR, aplicándolas en casos concretos, sobre los cuales se puede medir el aporte generado, destacando levantamientos con cierto nivel de complejidad como el del *Museu Marítim de Barcelona* a escala arquitectónica y *Tossa de Mar* a escala Urbana, entre otros.
- **Diferencias entre escáneres.** Se realizaron casos de estudios puntuales, principalmente el estudio de Fabra i Coats, que permitieron comparar los TLS que dispone el LMVC, un escáner de tiempo de vuelo Riegl z420i y uno de diferencia de fase Faro Focus^{3D}, logrando identificar las características de cada uno, sus fortalezas y sus limitantes. Este proceso ha ayudado a ampliar el conocimiento de los instrumentos del LMVC, consiguiendo con ello tomar una mejor decisión de instrumentación a utilizar según cada proyecto.

- **Información TLS como base estándar entre disciplinas.** En las entrevistas se plantea la necesidad de un método de levantamiento riguroso en todos los proyectos desarrollados, destacando la carga de fidelidad de los ejercicios ejemplificados y la necesidad de metodologías y bases, que permitan estandarizar los procesos que se aplican en los bienes patrimoniales.

Selección, identificación, organización, relación:

- **Desde una base de datos la extracción de diferentes informaciones.** A partir de las metodologías planteadas, cada profesional extraerá un tipo de información de la misma, según sus conocimientos y la finalidad que quiera darle según su enfoque.
- **Reducir errores de planificación al relacionar información con una métrica correcta.** A través de la toma de decisiones basada en una mayor información, generando con ello especificaciones más claras para los contratistas y facilitar el control de los logros de los proyecto.
- **Propuestas de desdoblamiento de entornos Urbanos, edificios a escala arquitectónica y elementos de detalle, pasando la información como base de datos 3D a 2D y 2.5D.** El desdoblamiento de un modelo 3D parte de la identificación de sus partes, su selección y recomposición, en función del objetivo y de la escala de trabajo, predefinidas antes de realizar el levantamiento. Plantear un único proceso de subdivisión de la realidad para plasmarlo en imágenes Ráster y que al mismo tiempo se relacionen con los modelos 3D es una tarea compleja, por ello se plantean casos concretos, como ejemplos de desdoblamiento de la realidad y la manipulación de los mismos, en relación a objetivos concretos, con el fin de buscar metodologías que permitan una estandarización de estos procesos.
- **Datos de referencia fiables para monitorizar cambios.** El estudio progresivo en el tiempo de un edificio patrimonial, a partir de varias prospecciones TLS durante un periodo de tiempo determinado, permite registrar los cambios en el tiempo de las características geométricas de los edificios patrimoniales, entendiendo la complejidad de estos, mediante metodologías que permiten relacionar la información en 2D - 3D (2.5D) y viceversa, del levantamiento patrimonial.
- **Ampliar la información geométrica de los materiales en dos dimensiones, manteniendo la información del color.** Logramos relacionar el relieve, porosidad, superficie de los materiales de fachadas, permitiendo su comparación con la información de color, tanto en 3D como en 2D (2.5D), para distinguir los cambios geométricos de las texturas de las superficies, especialmente útil en campos que estudien cambios entre materiales, como la geología, restauración, arqueología, etc.
- **Mejora de la comunicación interdisciplinaria.** Se plantea la necesidad de establecer un discurso entre el plano en 2D y los modelos en 3D, como un producto intelectual, que permita dar a entender enfoques específicos del bien patrimonial.
- **Reducir la duplicación de trabajo,** al relacionar bases de datos corregistradas, evita el duplicar las actividades de registro entre disciplinas, a diferentes escalas y niveles de detalle, evitando con ello plantear resultados que se contradigan, o que se basen en documentaciones que no correspondan con la precisión métrica esperada en base a los objetivos preliminares.
- **Aplicaciones y herramientas para la restauración.** Las aplicaciones varían con respecto al proyecto a ejecutar, desde llevar un registro del cambios, control de daños, control de limpieza, la medición y zonificación fiable, el control de su evolución de un deterioro, generar

presupuestos detallados de futuras intervenciones, la documentación del estado de conservación, ser una base fiable para presupuestar las actuaciones a realizar, ayuda a identificar materiales o tipos de piedra, etc.

- **Clasificación de la nube de puntos 3D.** Se identificaron procesos para la clasificación de nubes de puntos, destacando dos líneas útiles a escala urbana y arquitectónica, la detección de planos múltiples Ransac y la clasificación de superficies naturales, la rugosidad y distribución de los puntos en el espacio. Estas técnicas combinadas han permitido la separación de elementos en entidades lógicas y su reagrupación según objetivos propuestos.
- **Se proponen procesos automatizados.** La densidad de puntos de TLS terrestre va en aumento, para ello se requieren procesos automatizados, minimizando la manipulación de los usuarios, en procesos para grandes y complejas escenas en 3D.

Sintetizar, suministrar información objetiva:

- **Mejor gestión en la conservación preventiva y mejora de la planificación basada en prioridades**. La información generada facilita la gestión de los proyectos, al partir de una base fiable, teniendo una repercusión directa en los costes de ejecución, al permitir una cuantificación más realista de las superficies desdobladas, permitiendo optimizar los presupuestos en base a las necesidades de conservación o de toma de decisiones.
- **Se contempla no tener un único producto final,** si no tener una base que genere muchos productos, dada la complejidad y la variedad de disciplinas que engloban a los edificios patrimoniales.
- **Optimizar la homogeneidad de las nubes de puntos y la resolución de los levantamientos.** La problemática de la resolución de las nubes de puntos se abordan en diferentes apartados de la tesis, desde la correcta planeación en la toma de datos, el filtrado de las nueves de puntos, incluyendo procesos de filtrado de la información de intensidad y color, hasta abarcar la optimización de la información como mapas en 2D y 2.5D. En este último punto es importante resaltar los resultados obtenidos en los casos de estudio de Tossa de Mar, *Fabra i Coats*, los murales de Sant Miquel y la fachada de la Catedral Vieja de Lérida (La Seu Vella) , al trasladar los valores de la nube de puntos a celdas ráster y la aplicación de filtros sobre esta información, logrando mantener las zonas de mayor resolución e interpolando datos de las zonas con menor información, a partir de un estudio preliminar de las resoluciones obtenidas en registro, y en relación a los objetivos propuestos.
- **Relacionar datos en 3D - 2D (2.5D) y viceversa.** Existe una necesidad clara de contrastar de forma directa la información en dos dimensiones con modelos en tres dimensiones, para comprender los bienes patrimoniales desde otro punto de vista, explicar temas específicos en los trabajos desarrollados, y ahorrar tiempo en trabajo de campo.
- **Permite generar un discurso entre planos y modelos.** Es interesante destacar que esta limitante se reduce cuando el material desarrollado tiene el mismo punto de vista como imagen en 3D que en 2D, un discurso de ida y de vuelta, es decir, si se amplía una característica concreta en una imagen mediante su procesamiento, siempre es conveniente anexar una vista homologa de la nube de puntos en tres dimensiones, permitiendo un mayor entendimiento del enfoque que se quiere plasmar.
- **Explotación de diferentes formatos de bases de datos en 3D y 2D (2.5D).** Es de especial interés los desarrollos desde rásters en varias disciplinas, especialmente cuando la manipulación de modelos en tres dimensiones sea una limitante, por la complejidad de su uso y aprovechamiento. Entendiendo como limitante la capacidad técnica de la persona que

va a explotar la información en 3D. Para ello se necesita un proceso de asimilación muy alto, con una inversión muy grande de tiempo, de instrumentos y de especialización.

- **Cuantificar a partir de datos TLS.** Destaca la necesidad de poder cuantificar zonas o volúmenes, con rigor, como paso previo a las intervenciones, tanto en términos cualitativos, como en relación a la valoración de los trabajos a realizar.
- **Las metodologías desarrolladas pueden ser aplicadas con otras bases de datos,** como por ejemplo las generadas a partir de modelos SFM (*Structural From Motion*, procesos de escaneado y modelado a partir de fotos), entendiendo las limitantes de las diferentes técnicas en cuanto a precisión y grado de detalle de la geometría y las ventajas de visualización que tienen las técnicas de levantamiento a partir de fotos. Este punto se incluye por las limitaciones económicas que tienen algunos edificios patrimoniales, que impide realizar levantamiento con un láser escáner.
- **Criterios de representación TLS (4.2.2 La representación del levantamiento arquitectónico).** Partiendo de que el resultado final se expresa mediante una representación gráfica, se profundiza en la forma de representar para trasmitir adecuadamente una información, y no sea un resultado enteramente técnico, carente de objetivos, entendiendo que un levantamiento se puede usar para diversos fines, con escalas y objetivos diferenciados.
- **Propuesta inicial para explorar la conversión de datos TLS como entidades vectoriales.** Las personas entrevistadas trabajan sobreponiendo imágenes fotográficas a planos vectoriales, pero no suelen trabajar operando o cruzando informaciones ráster, siendo esta manipulación un proceso nuevo para el desarrollo de sus proyectos. Todas las entrevistas coincidieron en la importancia de la información vectorial a partir de la información presentada, ya que para ellos es la herramienta más fácil de utilizar, no siempre con programas CAD, también con el uso de otros programas de vectorización. Queda en evidencia que se suelen utiliza de forma complementaria capas ráster, que se ponen detrás del dibujo vectorial, como capas de interpretación, ejemplo histórica o de años, etc.
- **Relación de las bases de datos.** La información en 2D no se debería desligar de la información en 3D, ya que se pierden cantidades ingentes de información del trabajo desarrollado y la explicación de estos.
- **Metodologías aplicables a métodos de captura paralelos al TLS y bases de datos complementarias**, entendiendo que estas técnicas y tecnologías se complementan con la información TLS. Las metodologías desarrolladas pueden aplicarse a otros sistemas basados en nubes de puntos, o imágenes ráster 2.5D que contengan información de edificios patrimoniales, como por ejemplo levantamientos SFM, levantamientos con infrarrojos como la del Kinect, o la integración con otros sensores como cámaras térmicas acopladas a un escáner. En la actualidad estas técnicas son relevantes en el mundo académico y profesional.
- **Manejo de la información 2D, 2.5D y 3D.** Los levantamientos TLS permiten el análisis geométrico de las fachadas, de los materiales y las superficies. Estos se pueden hacer tanto en 3D como en 2,5D y 2D, entendiendo que los modelos 3D pueden contener varios campos de datos y los planos 2D, se pueden superponer unos a otros, como herramientas que permiten explorar la información de los edificios patrimoniales y con ello el conocimiento de los mismos.
- **Comparación de bases de datos 3D y 2D (2.5D).** Identificamos algunas de las ventajas y limitantes de la manipulación de la información de nubes de puntos entre mapas 2D (2.5D) y modelos 3D, las cuales en sus diferentes formatos permite diferentes niveles de aproximación.

- **Procesamiento de imágenes.** Los diversos casos de estudio permitieron aplicar técnicas de procesos en imágenes para ampliar rasgos o características de los elementos estudiados. Aunque en las entrevistas se plantea que las imágenes obtenidas son “elocuentes y útiles”, se hizo evidente que la aplicación de procesos de filtrado para casos de estudio concretos debe ser objeto de un intercambio de ideas e informaciones, de forma extensa entre las disciplinas involucradas.

Trabajo futuro

- Es necesario delimitar para que puede servir cada ráster generado, aunque en principio se entienden que son fuente de información valida. Para ello es necesaria la colaboración entre las disciplinas involucradas, con enfoques específicos.
- Profundizar en procesos de vectorización de las nubes de puntos, al ser una base de síntesis, complementada con información fotográfica de textura, color (utilizando una carta de color para el nivel de blancos) y métodos de filtrado, como base para lograr un mayor entendimiento de lesiones o procesos de restauración sobre un bien patrimonial.
- Clasificación del suelo de entornos urbanos, y su análisis con técnicas de topografía, a identificar puntos críticos, para personas con movilidad reducida, en entornos urbanos.
- Profundizar en las unidades estratigráficas de la arquitectura patrimonial, de forma objetiva - critica subjetiva, con una lectura crítica de valores históricos y artísticos de los elementos estudiados. Para ello será indispensable la colaboración de arqueólogos o historiadores, en el desarrollo de un proyecto, desde la etapa de toma de datos, hasta el desarrollo de imágenes que amplíen características específicas o zonifiquen elementos con características similares, en base a unos objetivos específicos.
- Desde el punto de vista técnico, comparar características técnicas del mismo procedimiento con otros casos de estudio, en relación a: densidad de datos/distancia, ángulo de incidencia, características del equipo, condiciones de iluminación, comparar TLS (ajustes y rendimiento necesario), precisión/exactitud, rendimiento alcanzado. A partir de ello identificar la fiabilidad de los resultados y los limitantes del método propuesto en relación a los casos propuestos, concretando las tipologías de análisis.
- Aplicar técnicas de clasificación de objetos en imágenes ráster, para la detección de patologías, obteniendo una zonificación, que remplace procesos manuales-visuales.

Anexos

Entrevistas completas.

Nos gustaría reiterar los agradecimientos a **Antonio Almagro Gorbea, Reinald Gonzàlez, Elena Urueña, Ernest Redondo Dominguez, Antonia Navarro Ezquerra,** por el tiempo, la disponibilidad y la dedicación en el desarrollo de estas entrevistas, las cuales han sido fundamentales como proceso de retroalimentación de los trabajos realizados, de reflexión y al mismo tiempo han sido ampliamente enriquecedores en cuanto a la concreción de criterios, a los cueles dirigir futuros esfuerzos, en la búsqueda de crear estándares y herramientas de trabajo entre las disciplinas que buscan recuperar y mantener el patrimonio.

Entrevista: Antonio Almagro Gorbea
Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Escuela de Estudios Árabes
Profesor de Investigación
http://www.laac.es/index.php?option=com_content&task=view&id=37&Itemid=50

1 ¿Cuál es su especialización?

Arquitecto investigador, especializado en la historia de la arquitectura Islámica y su restauración.

2 ¿Qué diferencias encuentra entre la información de levantamientos en 3D y en 2D?

La nube de puntos es una información a medio elaborar, nosotros con lo que trabajamos a la hora de hacer proyectos, publicaciones y análisis, generalmente son documentos 2D, siempre he visto el problema del paso de la nube de puntos a los planos vectoriales, por ello trabajamos con Fotogrametría estereoscópica, para pasar de una realidad tridimensional a un documento bidimensional con el que trabajo.

En cuanto al material presentado.

Vamos a ver, yo creo que esta es una de las, no digo de las primeras veces, pero de las veces que estoy viendo una elaboración de la información de la nube de puntos, hacia la realización de un documento, gráficos útiles, de los trabajos tanto de análisis, estudio del patrimonio como de conservación, por eso me parece, que es bastante positivo.

El problema es que la nube de puntos son muy espectaculares, sobre todo cuando los mueves, y los manipulas, pero en el fondo fuera de esa visión espectacular, son muy poco útiles, para quien realmente tiene que trabajar con esa información, en ese sentido creo que los documentos que has generado a partir de las nubes de puntos, en un mundo que yo ya no controlo tanto, pero que el documento gráfico que visualizo, está mucho más cerca de lo que es utilizable, en lo que es documentos de trabajo en el patrimonio.

3 ¿Qué aplicación desarrollaría basándose en los ejercicios expuestos?

Estoy acostumbrado a trabajar con dibujos vectoriales, porque son más fáciles de reelaborar, es decir, si yo tengo que hacer una propuesta de proyecto, yo lo hago mejor usando AutoCad, que no un programa de tratamiento ráster, no sé si una de estas imágenes ráster, sobretodo las que están más filtradas y elaboradas, son susceptibles a transformarse al documento vectorial.

En relación a la conversión ráster a vector:

Pienso que aunque el software realizara el trabajo automático de dibujar las líneas, quedaría un segundo trabajo que es del experto de dar la clasificación, por decirlo de alguna manera, en capas, es una labor bastante más sencilla que todo el proceso de generar las líneas, aunque se obtuviera el dibujo donde todas las líneas estuvieran en una única capa, la labor de clasificarlas líneas en capas seria relativamente un trabajo menor, comparado con la elaboración del dibujo base.

Esto es una sugerencia, no sé si ahora alguien que este empezando, porque los que llevamos años trabajando en la representación de la arquitectura tenemos condicionantes nuestra formación y como hemos venido trabajando, no sé si el venir trabajando con imágenes ráster es más práctico.

Yo ahora estoy trabajando con escaneado y fotogramétricos, utilizar el escáner, la nube de puntos combinado con fotos 3D, lo que obtengo es una orto foto, la suelo superponer al dibujo vectorial que he generado por restitución estereoscópica, de tal manera, que yo hago la restitución, el análisis y la selección de líneas, pero **otra información como el color y la textura la añado como un fotoplano, puesto detrás del dibujo vectorial**, es un documento que para mí es muy válido, porque la orto foto puede estar en una capa, que elimino del dibujo y **añado otras capas que son de interpretación, por ejemplo histórica o de años, etc.**

4 ¿En qué campos o disciplinas relacionadas al patrimonio serían útiles las técnicas explicadas?

Yo creo que en general **pueden serlo en todos los campos**, porque la intervención en el patrimonio, requiere de **una información preliminar que tiene que ser gráfica**, tanto para la generación de esos dibujos de base, que **yo creo que donde habéis llegado a conseguir el dibujo vectorial de forma semiautomática el paso no sea difícil**, pero también pienso que desde luego las orto fotos son válidas, no sé si todo el proceso de filtrado que hacéis, esa información que detectáis más porosa, o más bien decir piedra más erosionada o alterada, tanto por degradación o en algunos casos será por labra, es decir piedras que tienen una textura distinta, la determinación digamos automática de diferentes texturas de un mismo material, todo eso son fuentes de información, **que habrá que ver para cada caso para que puede servir, pero en principio es fuente de información.**

5 ¿Cuál cree que es la forma más práctica para manipular esta información desde su campo de estudio?

El problema que yo veo en estos procesos, es si estos procesos los tiene que hacer un especialista, en software especializado, en un laboratorio, lo que hace es facilitar los documentos gráficos elaborados o semielaborados, o si hay posibilidad si alguien no muy experto pueda utilizar estos sistemas. En ese sentido he sido auto usuario, he aprendido Fotogrametría porque me interesaba usar la Fotogrametría yo directamente, estoy trabajando con nubes de puntos a un nivel muy

experimental. **Habría que saber muy claramente que aplicaciones concretas tendría un determinado proceso de filtrado**, **de generación de las imágenes, que es capaz de generar**. **No soy capaz de ver para que caso concreto valdría que cosa, eso tendría que ser objeto de un intercambio de ideas e información más extensa.**

Creo que esas informaciones en algunos casos los dibujos ya son suficientemente elocuentes, en otros casos convendría superponerlos con dibujos vectoriales, también porque los dibujos vectoriales muchas veces facilitan oros procesos que son necesarios en el proyecto, como las mediciones de superficies, los grafiados de zonas a intervenir, lo que se hace a través de dibujo vectorial.

6 ¿Qué material complementario usaría con el material expuesto?

Imágenes de termografía para detectar focos de humedad por ejemplo, zonas frías zonas más calidad, que ayudaran a entender comportamientos del edificio, y cualquier otro tipo de análisis, es decir, al final el estudio de un edificio acaba plasmándose en informaciones gráficas, donde se superpone capas, diversas informaciones, que a su vez deberán ser interpretadas, este tipo de información se puede complementar **con imágenes de termografía, u otras informaciones obtenidas manualmente, el análisis de paramentos, análisis arqueológico, para tratar de ver el proceso constructivo, o el proceso de alteración, entendido como un proceso histórico.**

7 Desde el punto de vista metodológico y partiendo de la base expuesta, ¿con que información comenzaría a trabajar?

Yo empezaría a trabajar con la información que me permitiría generar el dibujo vectorial, porque es una información más de síntesis, que permitiría el entendimiento más primario del edificio, después la información de color, ayuda a entender los problemas de materiales e información que ayude a entender lesiones, luego ya aquellos procesos que son más complejos de filtrado y de generación de otros tipos de informaciones.

8 ¿Qué limitantes encuentra en el uso de esta información?

El problema sería saber si yo puedo generar manipular esta información, por si existirá un software o una metodología de manejo de software que me permita hacerlo, o si yo tenga que depender de una persona que haga estas imágenes. Estas cosas están muy bien y en principio son muy interesantes, pero en patrimonio no todo son la Seu Vella de Lérida, o son los grandes monumentos, con grandes monumentos, hay mucho patrimonio que tenemos que intervenir con una gran limitación de medios, yo una de las cosas que he intentado desarrollar es sistemas de Fotogrametría muy sencillos, que hago con una cámara fotográfica y con un medidor de distancia láser, a base de tomar algunas referencias en el propio objeto, esta pared es vertical y es la que define el plano de proyección, esa es una metodología que permite ser aplicada en una generalidad de casos, que si yo necesitara la instrumentación, de la cual también dispongo, que es mucho más complejo de manejo pues no la puedo aplicar a todo, en qué punto, para hacer este trabajo puedo utilizar un especialista, o puedo utilizar una metodología o unos instrumentos que unas personas no especialistas lo puedan utilizar.

Entrevista: Reinald Gonzàlez
Director de VERCLUS.

Docencia en diferentes cursos y Masters sobre documentación arquitectónica y arqueológica.
http://www.veclus.cat/La%20nostra%20gent/LA%20NOSTRA%20GENT.html

1 ¿Cuál es su especialización?

Soy doctor en Historia del Arte, historiador y arqueólogo. En mi época no existían titulaciones de Arqueología.

2 ¿Qué diferencia encuentra entre la información de levantamientos en 3D y 2D?

Tiene un **potencial enorme desde el punto de vista de la intervención y el estudio del patrimonio construido**. Tiene muchísimo potencial aplicado tanto a los propios edificios como a la realidad visual de estos. Yo entiendo que desde el punto de vista del patrimonio es muy importante.

3 ¿Qué aplicación desarrollaría basándose en los ejercicios expuestos?

En todos los proyectos en los que he trabajado hubiera sido interesando disponer de esta información.

Para mi hay un pequeño matiz, una cosa es mi aproximación métrica a las cosas, para lo que **yo requiero un 2D**. Yo soy viejo, me he hecho mayor, con lo cual yo sigo pensando en 2D. Pero ahora por ejemplo estamos haciendo una cosa en Ripoll de unas tumbas y tal y yo las estoy dibujando y haciendo el 3D, a línea. Es decir, **la carga de fidelidad, eso es importante, y yo creo que aquí hay mucho potencial.**

4 ¿En qué campos o disciplinas relacionadas al patrimonio serían útiles las técnicas explicadas?

En principio para todas. Lo que sucede es que entiendo que desde el punto de vista de la metodología de trabajo, de los conocimientos, etc. yo creo que es prácticamente **imprescindible entrar en arquitectura, escultura, patrimonio construido**. Yo entiendo que es patrimonio construido. **Es una herramienta fundamental en patrimonio construido** que yo de todos modos te agradezco que hagas esto, tenemos las herramientas, pero nadie se pone a ello, generamos cosas, tenemos una nube de puntos brutal pero luego que quieres ¿qué haga con esto?. No vale solo la faena en bruto de elaboración, en este caso requiere de un mayor desarrollo. **No sé si llamarlo trabajo, en tiempos absolutos de tiempo pero sí que requiere un mayor desarrollo para ser mucho más positiva, porque aparte es muy fiel y por eso es transcendente**. **Tu trabajas poco con cosas que desaparecen; yo constantemente. Con lo cual, o lo hago muy bien, lo hago lo mejor que puedo, o lo que desaparece, desaparece.** Puede quedar una foto, si se puede hacer de esta manera, o con métodos de este tipo, tú generas una referencia virtual de cosas que desaparecen, lo cual es muy importante. Y yo toco tanto cosas que desaparecen como que no, y esto para lo que desaparece es ideal.

5 ¿Cuál cree que es la forma más práctica de manipular esta información desde su campo de estudio?

En este caso estás hablando con alguien de 1955; para mí es más fácil vectorial, me he criado con vectorial, he mamado escalímetro. Con lo cual me es muy difícil moverme en otros parámetros. **A mí**

el 2D me sirve para trabajar, pero ya llevo años, muchos años además, en los que me he dado cuenta que **si yo no traslado esto a un proceso de 3D, se pierde cantidades ingentes de información** del trabajo que haces. Trabajo en 2D, pero siempre lo devuelvo en 3D, porque si no, no lo ves, de otra forma le haces **un flaco favor a la arquitectura histórica, al patrimonio construido, si no le das esta salida.** Con esto la gente entiende lo que has hecho y que le estas explicando, si no, no entienden nada.

6. ¿Qué material complementario usaría con el material expuesto?

Para la toma de datos y a su vez para la transposición de esos datos, generalmente cuando tú haces algo, **con indiferencia del texto que le pongas a esas cosas, lo acabas traduciendo en dibujo,** siempre. Cuando hacemos plantas, normalmente acabas levantándolas, con lo cual **siempre acabas levantando.** No sé qué me haría falta por que en cada caso, yo pienso que tienes que partir de uno mínimos, y yo por ejemplo **me gustaría como puedes trabajar las identificaciones cronológicas de diferentes partes de paramentos.**

El medico ve una radiografía y ve cosas, yo veo esto y veo cosas, la cuestión es como grafiar eso sin alterar la calidad del dibujo. Luego también hay aspectos muy importantes de acabados que liman muy bien con el tema de la restauración que merecerían también una cierta reflexión a la hora de plantear estas presentaciones. Por ejemplo estaba pensando en los tapajuntas de longitudes determinadas, es decir la escala en la que trabajamos, por ejemplo **te puedo decir que realces el detalle del tapajuntas**, no es tanto un enfoque técnico, es según un enfoque. Da mucho más de si el dibujo, ya no es un tema arqueológico o no, nos dará la aproximación al cierre original del edificio, donde falla y donde debemos restaurar.

Por ejemplo jugar con un juego de luces, para detectar el tipo de trabajo del sillar, por ejemplo el medieval tiene dos o tres tipos de acabados, modificando como lo iluminas, ganas en definición cronológica, en definición material, en estado desde un punto de vista arquitectónico, etc., yo pienso que haga falta, pienso que es necesario, creo que es un trabajo de más gente, en cualquier caso da eso.

En lugar de la necesidad de material complementario, la necesidad seria del propio material en partes, explicarlas individualmente y recomponerlas tanto en planos en 2D como en vistas en 3D. No solo del estado actual si no de la restitución.

7 Desde el punto de vista metodológico y partiendo de la base expuesta, ¿con qué información comenzaría a trabajar?

Comenzaría como lo has hecho tú. Me da las suficientes pistas para saber por dónde quiero llevarlo.

Este discurso de ida y de vuelta, es el que es productivo intelectualmente, es el que te da las pistas para exigirle mucho más. Siempre necesitaría a parte del 2D ese mismo punto pero en vista 3D, pues es lo que te permite saber hasta donde puedes llevarlo. La idea no es tener un producto que genere un producto final, si no tener un producto que genere un montón de productos finales.

8 ¿Qué limitantes encuentra en el uso de esta información?

Una fundamental, y es **la capacidad técnica de la persona que lo va a trabajar.** Yo he trabajado con nubes de puntos y he sufrido muchísimo con lo cual sé que es muy difícil por el déficit de conocimiento que hay sin contar aparte que es poco práctico por la carga de peso que tiene.

Los procesos gráficos que tu generas pesan mucho**, necesitan un proceso de asimilación muy alto el cual conseguirlo necesita una inversión muy grande de tiempo.**

Problema de disciplinas, dejar tanta carga de información, sin poder jugar con ella, me refiero interrogarla, moverme, me resulta extremadamente complicado. Me parece interesantísimo, sobre todo por el punto de racionalización.

Entrevista: Elena Urueña
Especialista en conservación y restauración.

1 ¿Cuál es su especialización?

Soy Licenciada en Bellas Artes por la Universidad Politécnica de Valencia, realicé la especialidad de Conservación y Restauración y posteriormente cursé un Máster en Restauración de Patrimonio Cultural.

2 ¿Qué diferencias encuentra entre la información de levantamientos en 3D y en 2D?

Previamente quisiera recalcar que este método y las imágenes obtenidas por él son un gran avance para la detección y recopilación visual de la información necesaria para conocer en qué estado de conservación se encuentra una obra. **Hasta la actualidad, en el campo de la Conservación y Restauración, se ha venido usando la fotografía como base para la extracción de información, siendo limitada la calidad y realidad de la misma**. Esto se debe al mal resultado que dan algunas cámaras, así como la limitación que se tiene por la perspectiva, con la que muchas veces se pierde información a tener en cuenta en el proyecto a estudiar. Tras realizar las fotografías, se volcaban en el ordenador, con un programa informático específico y se trataban las imágenes mediante colores para poder conseguir y detallar los daños de la obra a tratar.

Con este tipo de escáner y con las imágenes obtenidas con él, el resultado es mucho más exacto y por consiguiente la información obtenida es más rigurosa y precisa que la conseguida con cualquier cámara fotográfica usada anteriormente.

Es por ello que los levantamientos en 2D y 3D pueden aplicarse en las diferentes especialidades de Conservación y Restauración del Patrimonio histórico-artístico: Pintura de caballete, pintura mural, escultura y patrimonio arquitectónico.

Un levantamiento en 2D, en el campo de la Restauración, sirve como recurso para preparar un croquis y mapa de los daños de la obra de arte. Se utiliza como base para especificar todos los tipos de alteraciones de la manera más real y detallada posible. Para ello se crea una leyenda con diferentes colores y texturas y se marcan los deterioros y la localización espacial de cada uno de ellos sobre la superficie de la obra.

En caso de tener el levantamiento en 2D complementado con una escala de medición, se pueden detallar los **porcentajes de cada deterioro sobre la superficie total, que servirán para delimitar de una forma más precisa cuales son los daños más importantes y más extensos y de esta manera realizar un presupuesto lo más ajustado y específico posible.**

El levantamiento en 3D se puede aplicar a obras volumétricas (fachadas arquitectónicas y esculturas volumétricas), sean o no exentas, en las que se precise y sea necesaria una información de todos su ángulos. **El 3D sirve de apoyo y complemento informativo al croquis de daños base, desarrollado en un levantamiento en 2D.**

3 ¿Qué aplicación desarrollaría basándose en los ejercicios expuestos?

Las aplicaciones a desarrollar variarán según la obra a tratar y las necesidades específicas del proyecto, los levantamientos en 2D y 3D se aplicarían para:

Delimitar todos los daños, su localización espacial y el porcentaje de los mismos según su ubicación, cuáles son los más importantes y cuáles son los que pueden evolucionar y aumentar poniendo en peligro la obra.

Obtener información acerca de los deterioros provocados por los agentes externos a la obra (factores climáticos o alteraciones provocadas por el hombre, resultado de cambios, transformaciones y manipulaciones) o por los agentes intrínsecos a la obra, derivados de las características físico-químicas de los materiales que lo componen.

Realización de presupuestos detallados a partir de la información recopilada, con el porcentaje y cantidad de cada procedimiento a ejecutar, ya que la información obtenida es lo más detallada y fidedigna posible.

Realización de una memoria explicativa con el estado de conservación de la obra, según las conclusiones a las que se haya llegado por el estudio pormenorizado de cada daño.

Con el estudio de los tipos de deterioro se puede delimitar y priorizar la urgencia de las actuaciones a realizar (no es lo mismo un daño que afecta a la estructura del edificio que uno que sólo afecta a la superficie del mismo).

Según el tipo de tratamiento aplicado a cada imagen (color, volumetría y líneas) se podrían ver los diferentes materiales que integran el objeto a restaurar

4 ¿En qué campos o disciplinas relacionadas al patrimonio serían útiles las técnicas explicadas?

En cualquiera que pueda completar la información de las características de la obra de arte, tanto de manera estructural, superficial, constructiva o estilística.

Es importante recalcar que la información conseguida con este escáner puede ser utilizada y aplicada por los diferentes tipos de disciplinas profesionales. Cada profesional extraerá un tipo de información de la misma, según sus conocimientos y según la finalidad que quiera darle a esta información.

Uniendo los conocimientos de cada uno (arquitecto, geólogo, arqueólogo, restaurador, etc.), se podrá completar la información y el significado de cada deterioro que deba ser restaurado.

5 ¿Cuál cree que es la forma más práctica para manipular esta información desde su campo de estudio?

Los levantamientos en 2D son lo más utilizado en restauración. Se realizaría una primera toma de información sobre papel para luego volcarla al ordenador con un programa informático adecuado para añadir la información obtenida. Esta información se puede complementar con un levantamiento en 3D para completar la información no conseguida con el 2D.

6 ¿Qué material complementario usaría con el material expuesto?

Sería necesario el manejo de diferentes programas informáticos para poder volcar y añadir la información obtenida por el Restaurador para el estudio de la misma.

7 Desde el punto de vista metodológico y partiendo de la base expuesta, ¿con que información comenzaría a trabajar?

Con un levantamiento en 2D impreso en papel.

8 ¿Qué limitantes encuentra en el uso de esta información?

Quizá la imposibilidad de contratarlo por el coste económico.

Entrevista: Antonia Navarro Ezquerra
Doctora en Geológicas
Profesora Asociada del Departamento de Construcciones Arquitectónicas II

1 ¿Cuál es su especialización?

Geóloga en materiales de construcción.

2 ¿Qué diferencias encuentra entre la información de levantamientos en 3D y en 2D?

Parto de la información en 2D, su representación en 3D reduciría el tiempo de trabajo de campo.

3 ¿Qué aplicación desarrollaría basándose en los ejercicios expuestos?

Tendría aplicación directa, por ejemplo estamos en la pedrera del Medol, pasaron un grupo Global de Valencia, e hicieron un levantamiento con escáner láser, dieron el gris, por así decirlo, sin textura, veo más o menos el relieve, pero necesito la foto que la acompañe, en algunos casos volvieron a pasar y nos engancharon una foto, y me pierdo al no tener profundidades, la cantera del Medol no sé cuántos metros cuadrados son, si me das un volumen, con el material que tengo tendría que estar todo el día mirando que es, en cambio sí me lo das así trabajado, me estás dando mucha información. En todos estos trabajos de 3D, en el ejemplo de la cantera, yo tengo por ejemplo dos frentes, y tengo que relacionar que pasa, también entre ellos, tengo que poder sacar un plano, que permita relacionar

puntos específicos en tres dimensiones, en relación al accidente geológico que se ha producido, que dirección de falla y salto tengo, cuanto se ha desplazado, eso en cuanto a geología, en cuanto a edificación.

Con las imágenes del ejemplo que has dado de Fabra i Coats, soy capaz de darte formas de alteración y proponer causas que las han podido generar, con el detalle que me das, dándome el relieve, se puede ver el relieve, la homogeneidad, las distancias entre el sillar, grosor del mortero. Tener informaciones tan diversas me pueden ayudar a interpretar. Yo cartografió en dos dimensiones, me das material para manejar diferentes puntos de información y si yo luego le puedo añadir una foto de color.

Estas acelerando el mapeo, yo para generar una información, me lo estas presentando en el laboratorio sin tener que desplazarme.

4 ¿En qué campos o disciplinas relacionadas al patrimonio serían útiles las técnicas explicadas?

Toda la gente involucrada en restauración. Donde aplicar estas técnicas directamente es en **control de limpiezas**, cuando se hace la limpieza del edificio es organoléptica, es decir está más limpio o está más sucio, en la cual pueda comparar la piedra antes de limpiarla y después, vas viendo la evolución, ¿hasta dónde puedo limpiar? En Oviedo había un grupo muy potente de geólogos, que contrato a IBM hace 15, la idea era esto en una fachada coger información, delimitar una zona que tiene afectación y daban herramientas para poder calcular superficies, que multiplicada por un tratamiento específico, se puede calcular el coste del tratamiento, el problema era el económico, tenía que tener un megaproyecto para poder llegar. También se realizó un proyecto Europeo de controlar sistemas de limpieza, en 2D, con diferentes longitudes de onda, para hacer el control de la limpieza, claro no de toda la fachada, era de la zona fotografiada, la superposición de estas fotos no era del todo correcta y a nivel de costes no llego a ser rentable, pero son precursores de lo que estas presentando.

Todo lo que es calcular lo puedes hacer a priori, no solo un material de soporte sino que puedes calcular costes.

5 ¿Cuál cree que es la forma más práctica para manipular esta información desde su campo de estudio?

Partir del detalle de la superficie, comparándola con la información de color.

6 ¿Qué material complementario usaría con el material expuesto?

Lo que yo puedo hacer es pasar información, de cómo se representa todo lo que recogemos nosotros, de estudios que luego hay que plasmarlos. Luego hay tratamientos, técnicas no destructivas, todo lo que tenga con luz podéis utilizar como canales, mirando la reflectancia podéis sacar temperaturas de materiales, pueden estar asociados a humedades.

En el hospital de San Pau en uno de los pabellones todas las paredes están recubiertas de baldosa cerámica, y se quería saber cómo estaba adherido sin tenerlas que sacar, es decir con métodos indirectos, lo probamos con la cámara de termo visión, enviábamos un calor, lo apagábamos

esperábamos la imagen, según lo que tuviera detrás enfriaba diferente, decía las que estaba enganchadas a toques, o las que estaban enganchadas al *step*, más hueco o menos hueco, podrías calcular en que zonas realizar la inyección.

7 Desde el punto de vista metodológico y partiendo de la base expuesta, ¿con que información comenzaría a trabajar?

Como siempre partimos en dos dimensiones, pues la foto de color, con carta de color. No veo mucha cosa en la nube de puntos en tres dimensiones, en cambio en la imagen ortogonal si, necesitaría el color con el relieve, es más importante para mí el relieve, pero debe ir acompañado con el color y la imagen de contornos, para poder saber que esta adelante y atrás.

La información es mejor de forma individual, las imágenes por separado, porque al combinarlas hace que imagine cosas, que por separado no las veo, que la operación entre imágenes las haga cada usuario, pero que se puedan hacer.

8 ¿Qué limitantes encuentra en el uso de esta información?

Tendríamos que tener un caso para ver las limitaciones, por ahora no veo ninguna.

Entrevista: Ernest Redondo Dominguez
Doctor arquitecto, profesor titular de universidad.
Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica I.
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona.
Universidad Politécnica de Cataluña-BarcelonaTech

1 ¿Cuál es su especialización?

Profesor de expresión gráfica arquitectónica.

2 ¿Qué diferencias encuentra entre la información de levantamientos en 3D y en 2D?

En tanto que usuario habitual de este tipo de representaciones, entiendo que ambas aportan informaciones similares, el único problema es que el manejo que de los modelos 3D, o de un modelo de información en 2D, en el caso del modelo 2D es más fácil, más asequible, más intuitivo, y el modelo 3D exige una capacidad de manejar el visor, el elemento para orientarte ortogonalmente, isométricamente, en cambio un 2D es un 2D, es básico.

3 ¿Qué aplicación desarrollaría basándose en los ejercicios expuestos?

Como proyectos que hago que pueda utilizar en materias con mis estudiantes, yo puedo entender que la gestión de la documentación en 3D, es lo que para mí tiene más interés, es lo que representa más novedad, más potencia de datos, y porque en una 2D el análisis que me llega ya lo ha hecho alguien y en una 3D desde el todo yo puedo ir yendo a menos información, mientras que en una 2D yo veo una parte de la información, mientras que en una 3D tengo más posibilidades de analizarla en otro proceso, mientras en 2D es la que hay, la que me dan hecha.

4 ¿En qué campos o disciplinas relacionadas al patrimonio serían útiles las técnicas explicadas?

En el registro, documentación y análisis de edificios, desde el punto de vista de volumetría, desde el punto de vista de cromático, así como desde lo que sería patología.

5 ¿Cuál cree que es la forma más práctica para manipular esta información desde su campo de estudio?

Probablemente la mejor sería disponer de una malla potente, generada a partir de una nube de puntos, donde los puntos estuviesen optimizados, de manera que a más nivel de precisión más puntos y en otras partes menos puntos. Es como una malla, nube de puntos optimizada, lo cual es difícil, porque la nube de puntos es sistemática, esa es la mejor, porque si no esta información tomada así tal cual, hay un proceso de analizar, pulir, y allí se va perdiendo precisión, por lo cual al final acaba resultando más cómodo un 2D, del cual generas un 3D por información complementaria, un 2D en planta y un 2D alzado, te acaban dando una información univoca y más fácil, que no de una nube de puntos generar un modelo 3D, es más cómodo, partes de una información en 2D, que alguien ha fragmentado, no es la natural, alguien ya ha hecho algo, y en una nube de puntos 3D tienes todos los puntos, pero tienes demasiada información como para saber cuáles son los puntos claves, hay un proceso de entenderlos, analizarlos, seleccionarlos, decidir, tomar decisiones, **es un proceso complicado, no es fácil, con lo que están utilizando los alumnos en clase, con lo que es software habitual, no es fácil.**

6 ¿Qué material complementario usaría con el material expuesto?

Imágenes térmicas, de resonancias acústicas, sonar, para discutir materiales, buenas fotografías, tomadas en condiciones de luz adecuadas y optimizadas. Referencias topográficas precisas, ayudaría mucho, una medida exacta de una esquina es vital.

7 Desde el punto de vista metodológico y partiendo de la base expuesta, ¿con que información comenzaría a trabajar?

Una buena orto fotografía frontal, bien iluminada con contraste, con esa información yo ya puedo hacer la primera interpretación y análisis de eso datos, dos medidas o tres medidas, precisas, tomadas con un instrumento convencional, el teodolito no hay que quitarlo.

8 ¿Qué limitantes encuentra en el uso de esta información?

La principal limitante probablemente el tamaño, de los ficheros, o el exceso de información, que no los hacen gestionables de manera simple, ficheros de mucho tamaño, de muchos megas, con muchos pixeles, con mucha calidad, que un ordenador normal no puede gestionarlo. Un problema de exceso. Una estrategia es fragmentarlo en partes, que encajasen exactamente y poder hacer el análisis por partes.