

UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA



Tesis Doctoral

Aplicación de técnicas geodésicas y técnicas avanzadas de captura, escáner láser y termografía, en el estudio patológico de la estructura y la cimentación en la restauración integral de la Catedral de Santa María de la Asunción de Coria.

Fernando Berenguer Sempere

Departamento de Expresión Gráfica

Cáceres, 2014

UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA



Tesis Doctoral

Aplicación de técnicas geodésicas y técnicas avanzadas de captura, escáner láser y termografía, en el estudio patológico de la estructura y la cimentación en la restauración integral de la Catedral de Santa María de la Asunción de Coria.

Fernando Berenguer Sempere

Departamento de Expresión Gráfica

Conformidad del Director

Fdo: José Juan de Sanjosé Blasco

Cáceres, 2014

*A mis padres, Fernando y María Jesús,
a mi hermana, Esther, a Tamara y Emilia.*

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos personales:

Al Dr. D. José Juan de Sanjosé Blasco, porque además de ser mi director de tesis se ha convertido en un padre académico.

Al Dr. D. Alan Atkinson Gordo, por colaborar de forma altruista en la obtención de datos para la elaboración de esta tesis.

A los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos D. Jorge Juan Romo Berlana y D. Emilio González Abril, por poner a mi disposición todos sus conocimientos adquiridos en sus trabajos realizados en la Catedral.

Al Catedrático Dr. D. Florencio García Mogollón, por ofrecerme toda su documentación sobre la Catedral.

A D. Oscar García Ballesteros, por facilitarme el trabajo dentro de la Catedral.

Al Dr. D. Salvatore Barba y a todo su equipo por dispensarme un cálido trato y acogerme en su laboratorio como uno más.

Al Dr. D. Luis Mariano del Río Pérez Director del grupo de investigación DIPAMAC y a todo su equipo, por prestarme su cámara termográfica.

Al Arquitecto D. Manuel Viola Nevado, por enseñarme todo lo que sabe de la Catedral de Coria.

Al Dr. D. Juan Antonio Pérez Álvarez por sus enseñanzas referentes a calibración de cámaras.

Al Dr. D. José Moreno del Pozo, por su ayuda en conceptos informáticos.

A los Arquitectos Técnicos D. Alberto Trancón Miguel y Gonzalo Morato Aguilar, y al Ingeniero Técnico de Obras Públicas D. Alberto Breña Santofimia, por los buenos momentos que hemos pasado en la Catedral.

A los Catedráticos D. Antonio Gómez Ortiz y D. Enrique Serrano Cañadas, Doctores D. Juan José González Trueba, D. Javier de Matías Bejarano, D^a. Montse Salvà Catarineu y D^a. Maria González García, y a los Licenciados en Geografía D. Ferran Salvador Franch, D. Manuel Gómez Lende y D. Ibai Rico Lozano, por hacer que el doctorado haya sido un camino de buenos momentos.

Agradecimientos institucionales:

Al Cabildo de la Catedral de la Diócesis Coria-Cáceres, por autorizarme a realizar la tesis doctoral sobre la Catedral de Coria.

Al grupo de investigación IGPU (Ingeniería Geomática y Patrimonio Urbano) dirigido por el Dr. D. José Juan de Sanjosé Blasco y su estrecho colaborador Dr. D. Alan Atkinson Gordo por poner a mi disposición todo lo necesario para elaborar esta tesis.

RESUMEN

El objetivo general que persigue la ejecución de esta tesis doctoral es la aplicación de técnicas geodésicas y la combinación de las técnicas de láser escáner y termografía para realizar el estudio patológico de la estructura y cimentación de la Catedral de Coria, para que posteriormente otras disciplinas puedan diagnosticar los fallos estructurales localizados e intenten subsanarlos.

Se establece una red geodésica y una red de nivelación geométrica de precisión para conocer el comportamiento dinámico de la base sobre la que se asienta la Catedral. Posteriormente se comprueba con el programa Geo-Studio, con datos geológicos y geotécnicos obtenidos en proyectos anteriores, un posible deslizamiento del talud situado al sur de la Catedral. Además, se propone una metodología de campo con el láser escáner y la cámara térmica, con un grado de fiabilidad y en tiempo reducido y se elabora una metodología para la integración de los datos obtenidos del láser escáner y la cámara térmica.

Todo este trabajo lleva a detectar aquellas grietas que han aparecido en la estructura, así como, aquellas zonas afectadas por humedades. Estas humedades se estudian en profundidad a partir de nuevos umbrales con un programa informático implementado en esta tesis. Finalmente, el trabajo desarrollado ha permitido realizar un estudio geométrico de la estructura localizando las desviaciones verticales y las deformaciones de las bóvedas.

ABSTRACT

The general aim of this doctoral thesis is to apply geodesic techniques and combine laser scanning and thermographic techniques for the pathological study of the structure and foundations of Coria Cathedral, so that other disciplines can diagnose any structural faults and solutions be sought.

A geodesic network and a precision geometric levelling network are established in order to know the dynamic behaviour of the base on which the cathedral stands. Later, by using geological and geotechnical data obtained in previous projects, the program Geo-Studio is used to check any possible slipping of the slope to the south of the cathedral. Moreover, a field methodology is proposed involving the use of the laser scanner and thermal chamber with a degree of reliability and in a reduced time, and a methodology is drawn up for the integration of the data obtained from the laser scanner and the thermal chamber.

All of this work leads to the detection of cracks that have appeared in the structure, as well as areas affected by humidity. This humidities are studied in depth with new thresholds using software implemented in this thesis. Finally, the work carried out has permitted a geometric study to be made of the structure in which any vertical deviations and deformations of the domes can be detected.

ÍNDICE GENERAL

PARTE I: MARCO REFERENCIAL	25
1.- Marco referencial.-	27
1.1.- Introducción.-	27
1.2.- Objetivos.-	28
1.3.- Estructura de la tesis.-	29
2.- Evolución histórica de la Catedral.-	31
2.1.- Descripción de la Catedral.-	31
2.2.- Historia constructiva.-	33
2.2.1.- Época medieval.-	33
2.2.2.- Primera fase de la construcción (1496-1530).-	33
2.2.3.- Segunda fase constructiva (1530-1547).-	34
2.2.4.- Tercera fase constructiva (1547-1570).-	34
2.2.5.- Cuarta fase constructiva (1570-1646).-	35
2.2.6.- Las obras del siglo XVIII.-	35
2.2.7.- El terremoto de 1755 y sus consecuencias.-	37
2.2.8.- Desde 1758 a la actualidad.-	37
PARTE II: ESTADO DEL ARTE.....	39
3.- Estado del Arte.-	41
3.1.- Introducción.-	41
3.2.- Estudios geotécnicos aplicados a la protección del patrimonio.-	41
3.3.- Estudios sobre levantamientos tridimensionales.-	43
3.4.- Estudios sobre técnicas termográficas.-	44
3.5.- Estudios sobre la calibración geométrica de la cámara.-	45
3.6.- Estudios sobre la combinación de las técnicas de láser escáner y termografía.- ..	46
3.7.- Estudios sobre documentación geométrica.-	46
PARTE III: MARCO TEÓRICO	49
4.- Sistemas GNSS.-	51
4.1.- Introducción.-	51
4.2.- NAVSTAR GPS.-	52
4.2.1.- Fases de desarrollo.-	52
4.2.2.- Segmento espacial.-	53
4.2.3.- Segmento de control.-	54
4.2.4.- Servicios GPS.-	54
4.3.- GLONASS: Global Navigation Satellite System.-	55
4.3.1.- Fases de desarrollo.-	55
4.3.2.- Segmento espacial.-	56
4.3.3.- Segmento de control.-	57
4.3.4.- Servicios GLONASS.-	58
4.4.- Normativa ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones).-	58
5.- Geotécnia.-	59
5.1.- Conceptos previos.-	59
5.2.- Concepto de factor de seguridad.-	60
5.3.- Influencia del tipo de material.-	61
5.3.1.- Suelos.-	62
5.4.- Tipos de movimientos.-	62
5.4.1.- Deslizamientos.-	63
5.5.- Morfología y partes de un deslizamiento rotacional.-	65
5.6.- Modos de fallo más usuales de los taludes asociados a estados límite.-	66

5.6.1.- Pérdida de la estabilidad global.-	66
5.6.2.- Deformaciones.-	66
5.6.3.- Erosiones.-	66
5.6.4.- Sismicidad.-	67
5.7.- Métodos de análisis de estabilidad de taludes.-	67
5.7.1.- Reseña histórica.-	67
5.7.2.- Principales métodos de análisis.-	67
6.- Láser escáner.-	75
6.1.- Introducción.-	75
6.2.- Principios del láser escáner.-	75
6.2.1.- El espectro electromagnético.-	75
6.2.2.- Propiedades de la luz láser.-	76
6.2.3.- Mediciones utilizando la luz.-	77
6.3.- Fuentes de error del láser escáner.-	80
6.3.1.- Errores instrumentales.-	80
6.3.2.- Errores relacionados con los objetos.-	82
6.3.3.- Condiciones ambientales.-	82
6.3.4.- Errores metodológicos.-	83
6.4.- Estado actual de un láser escáner.-	84
7.- Termografía.-	85
7.1.- Evolución histórica de la termografía.-	85
7.2.- Definición de termografía.-	85
7.3.- Importancia de la termografía.-	85
7.4.- Emisión, reflexión y transmisión.-	86
7.5.- Principios físicos.-	88
7.5.1.- Ley de Planck.-	88
7.5.2.- Ley de desplazamiento de Wien.-	89
7.5.3.- Ley de Stefan-Boltzman.-	89
7.6.- La imagen termográfica.-	90
7.6.1.- Rango de temperatura, nivel y campo.-	90
7.6.2.- Características de la resolución.-	91
7.6.3.- Forma de tomar una imagen térmica.-	91
7.6.4.- Métodos de análisis de las imágenes térmicas.-	92
7.6.5.- Cómo se compensa la imagen térmica.-	94
PARTE IV: METODOLOGÍA DE TRABAJO	95
8.- Red de control posicional tridimensional.-	97
8.1.- Planteamiento.-	97
8.1.1.- Objetivos.-	97
8.1.2.- Instrumentación.-	97
8.1.3.- Monumentación.-	97
8.1.4.- Metodología.-	97
8.1.5.- Seguimiento de la Red de Control Posicional Tridimensional.-	98
8.1.6.- Resultados esperados y líneas de actuación.-	98
8.2.- Red Externa GNSS.-	99
8.3.- Red de Proximidad GNSS.-	99
8.4.- Coordenadas.-	100
8.4.1.- Coordenadas de la campaña 2012.-	100
8.4.2.- Coordenadas de la campaña 2013.-	101
8.5.- Resultados.-	101
8.6.- Red Interna de Nivelación Geométrica.-	103

8.6.1.- Metodología.-	103
8.6.2.- Procedimiento.-	104
8.6.3.- Resultados.-	105
8.7.- Conclusión.-	105
9.- Control de estabilidad de ladera.-.....	107
9.1.- Introducción.-	107
9.2.- Geología y geotecnia de la zona.-	107
9.2.1.- Trabajo de Vorsevi.-.....	107
9.2.2.- Trabajo de GMC.-	109
9.3.- Sismología de la zona.-	111
9.3.1.- Antecedentes históricos.-	111
9.3.2.- Identificación de la Acción Sísmica.-	111
9.3.3.- Cálculo sismorresistente.-	115
9.3.4.- Consideraciones finales.-	116
9.4.- Estudio de la ladera.-	120
9.4.1.- Topografía de la zona.-	120
9.4.2.- Estudio del perfil nº 7.-	123
9.4.3.- Estudio del perfil nº 3.-	133
9.4.4.- Estudio del perfil nº 4.-	141
9.4.5.- Resultados.-	146
9.4.6.- Conclusión.-	147
10.- Técnica de láser escáner.-	149
10.1.- Objetivos.-	149
10.2.- Instrumental.-	149
10.3.- Metodología.-	149
10.3.1.- Trabajo de campo.-.....	149
10.3.2.- Procesamiento de datos.-	151
10.3.3.- Obtención de ortoimágenes.-.....	155
10.3.4.- Georreferenciación.-.....	156
10.4.- Resultados.-	157
10.4.1.- Ortofotos.-	157
10.4.2.- Identificación de grietas.-	159
11.- Técnica termográfica.-	163
11.1.- Objetivos.-	163
11.2.- Equipo.-	163
11.3.- Metodología.-	163
11.3.1.- Calibración métrica de la cámara termográfica.-	163
11.3.2.- Trabajo termográfico.-	171
11.3.3.- Combinación de técnicas.-	172
11.4.- Resultados.-	172
11.4.1.- Modelos 3D termográficos.-	172
11.4.2.- Ortotermogramas.-	176
12.- Programa informático para la detección de humedades.-	181
12.1.- Introducción.-	181
12.2.- Descripción del funcionamiento del programa.-	181
12.2.1.- Primer paso: división de la imagen.-	182
12.2.2.- Segundo paso: umbralización de la imagen.-.....	183
12.2.3.- Tercer paso: mezcla de las imágenes resultantes.-	185
12.3.- Visualización de isotermas.-	185
12.4.- Pseudocódigo de la aplicación.-	187

13.- Estudio geométrico.-	189
13.1.- Introducción.-	189
13.2.- Plantas.-	191
13.3. Secciones longitudinales.-	197
13.4.- Secciones transversales.-	205
13.5.- Bóvedas.-	213
13.5.1.- Bóveda 1.-	214
13.5.2.- Bóveda 2.-	215
13.5.3.- Bóveda 3.-	217
13.5.4.- Bóveda 4.-	219
13.5.5.- Bóveda 5.-	220
13.6.- Topografía de las bóvedas.-	222
V PARTE: CONCLUSIONES	225
14.- Conclusiones.-	227
14.1.- Conclusiones particulares.-	227
14.2.- Conclusiones generales.-	232
14.3.- Futuras líneas de actuación.-	233
15.- Conclusions.-	235
15.1.- Particular Conclusions.-	235
15.2.- General conclusions.-	240
15.3.- Future lines of work.-	241
16.- Bibliografía.-	243

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Fachada norte de la Catedral (elaboración propia).	31
Figura 2.- Fachada sur de la Catedral (elaboración propia).	31
Figura 3.- Interior de la Catedral (elaboración propia).	32
Figura 4.- Fachada oeste de la Catedral (elaboración propia).	32
Figura 5.- Pergamino del maestro Bartolomé de Pelayos, 1503 (García, 1999).	33
Figura 6.- Planta de la Catedral, 1560 (García, 1999).	34
Figura 7.- Alzado de la torre catedralicia. 1732 (García, 1999).	36
Figura 8.- Esquema de la evolución de los sistemas GNSS (elaboración propia).	52
Figura 9.- Distribución original de la constelación de 24 satélites (Colorado, 2013). ...	53
Figura 10.- Segmento de control GPS (Colorado, 2013).	54
Figura 11.- Plan de renovación de GLONASS (Glonass, 2005).	55
Figura 12.- Constelación GLONASS (Glonass, 2005).	56
Figura 13.- Distribución de frecuencias aprobada por la ITU (Coit, 2013).	58
Figura 14.- Talud Catedral de Coria (García, 1999).	60
Figura 15.- Rotura típica con forma cilíndrica (Varnes, 1978).	63
Figura 16.- Diferentes superficies circulares de rotura (elaboración propia).	64
Figura 17.- (a) Nomenclatura de una zona de falla. (b) Tipos de falla (Varnes, 1978)..	64
Figura 18.- Esquema de un deslizamiento rotacional (Varnes, 1978).	66
Figura 19.- Esquema estático del método Morgenstern-Price.	68
Figura 20.- El espectro electromagnético (www.astrofiscicayfisica.com).	75
Figura 21.- Espectro visible (Light Sensitiv, 2008).	76
Figura 22.- Métodos de medida que utilizan la luz (Blais, 2006).	77
Figura 23.- Medición láser por pulsos (Elaboración propia).	78
Figura 24.- Principio basado en el tiempo de vuelo (elaboración propia).	79
Figura 25.- Principio de medición basado en la fase (elaboración propia).	79
Figura 26.- Reflexión sobre una superficie lambertiana (elaboración propia).	82
Figura 27.- Emisión (ϵ), reflexión (ρ) y transmisión (τ) (elaboración propia).	86
Figura 28.- Emisión (ϵ) (elaboración propia).	86
Figura 29.- Reflexión (ρ) (elaboración propia).	87
Figura 30.- Transmitancia (τ) (elaboración propia).	87
Figura 31.- Rango, campo y nivel (elaboración propia).	91
Figura 32.- Píxel, FOV e IFOV (elaboración propia).	91
Figura 33.- Imagen infrarroja de las dos cristales de una puerta (elaboración propia). .	92
Figura 34.- Imagen infrarroja. Humedad Sala del Archivo (elaboración propia).	93
Figura 35.- Imagen infrarroja de un motor recalentado (elaboración propia).	93
Figura 36.- Red Externa GNSS.	99
Figura 37.- Red de Proximidad.	100
Figura 38.- Nivelación geométrica. Método del punto medio (Chueca et al., 1996). ...	103
Figura 39.- Puntos de la nivelación geométrica.	104
Figura 40.- Mapa de Peligrosidad Sísmica (NCSE, 2002).	113
Figura 41.- Espectro de respuesta elástica.	114
Figura 42.- Diferentes tipos de estructuras (artículo 3.7.2.2. NCSE-02).	116
Figura 43.- Relación entre el cociente de tensiones.	118
Figura 44.- Localización de la Catedral de Coria (al sur de la ciudad).	120
Figura 45.- Situación de la Catedral junto al talud bajo estudio.	121
Figura 46.- Plano de la situación de los distintos perfiles.	121
Figura 47.- Perfil longitudinal nº 3.	122
Figura 48.- Perfil longitudinal nº 4.	122

Figura 49.- Perfil l longitudinal nº 7.....	123
Figura 50.- Perfil nº 7 en Geo-Studio.....	124
Figura 51.- Cargas transmitidas por la bóveda.....	125
Figura 52.- Distribución de la carga sobre el muro de la sacristía.....	125
Figura 53.- Carga producida por la abalaustrada.....	126
Figura 54.- Superficie de deslizamiento para un F.S.=1.123.....	127
Figura 55.- Rebanadas de la superficie de deslizamiento.....	127
Figura 56.- Mapa de seguridad para un rango de F.S. de 1.123-1.129.....	128
Figura 57.- Superficie de deslizamiento para un F.S.=1.101.....	128
Figura 58.- Rebanadas de la superficie de deslizamiento.....	129
Figura 59.- Mapa de seguridad para un rango de F.S. de 1.101-1.107.....	129
Figura 60.- Superficie de deslizamiento para un F.S.=0.984.....	130
Figura 61.- Rebanadas de la superficie de deslizamiento.....	130
Figura 62.- Mapa de seguridad para un rango de F.S. de 0.984-0.990.....	131
Figura 63.- Superficie de deslizamiento para un F.S.=0.968.....	131
Figura 64.- Rebanadas de la superficie de deslizamiento.....	132
Figura 65.- Mapa de seguridad para un rango de F.S. de 0.968-0.973.....	132
Figura 66.- Perfil nº 3 en Geo-Studio.....	134
Figura 67.- Superficie de deslizamiento para un F.S.=1.269.....	135
Figura 68.- Rebanadas de la superficie de deslizamiento.....	135
Figura 69.- Mapa de seguridad para un rango de F.S. de 1.269-1.310.....	136
Figura 70.- Superficie de deslizamiento para un F.S.=1.224.....	136
Figura 71.- Rebanadas de la superficie de deslizamiento.....	137
Figura 72.- Mapa de seguridad para un rango de F.S. de 1.224-1.259.....	137
Figura 73.- Superficie de deslizamiento para un F.S.=1.116.....	138
Figura 74.- Rebanadas de la superficie de deslizamiento.....	138
Figura 75.- Mapa de seguridad para un rango de F.S. de 1.116-1.151.....	139
Figura 76.- Superficie de deslizamiento para un F.S.=1.077.....	139
Figura 77.- Rebanadas de la superficie de deslizamiento.....	140
Figura 78.- Mapa de seguridad para un rango de F.S. de 1.077-1.109.....	140
Figura 79.- Perfil nº 4 en Geo-Studio.....	141
Figura 80.- Carga producida por la solera de la plazoleta.....	142
Figura 81.- Superficie de deslizamiento para un F.S.=1.248.....	143
Figura 82.- Rebanadas de la superficie de deslizamiento.....	143
Figura 83.- Mapa de seguridad para un rango de F.S. de 1.248-1.249.....	144
Figura 84.- Superficie de deslizamiento para un F.S.=1.224.....	144
Figura 85.- Rebanadas de la superficie de deslizamiento.....	145
Figura 86.- Mapa de seguridad para un rango de F.S.=1.224-1.249.....	145
Figura 87.- Situación de dianas en el exterior de la Catedral.....	150
Figura 88.- Situación de dianas en el interior de la Catedral.....	150
Figura 89.- Nube de puntos completa sin limpiar.....	153
Figura 90.- Nube de puntos completa y limpia.....	154
Figura 91.- Sección de la cercha número 3 en RGB.....	154
Figura 92.- Sección por el centro de bóveda número 4 en intensidad.....	155
Figura 93.- Sección de la planta en color verdadero (1 metro).....	155
Figura 94.- Ortofotografía en escala de grises.....	157
Figura 95.- Ortofotografía en color de intensidad.....	158
Figura 96.- Ortofotografía en color verdadero.....	158
Figura 97.- Dibujo en 2D en Autocad a partir de una ortofoto.....	158
Figura 98.- Plano de una sección de la Catedral.....	159

Figura 99.- Grietas de la fachada este de la Catedral.	160
Figura 100.- Grietas de las bóvedas de la Catedral.	161
Figura 101.- Grietas en el interior de la Catedral.	162
Figura 102.- Grietas en el interior de la Catedral.	162
Figura 103.- Modelo de calibración de Photomodeler.	164
Figura 104.- Patrón de calibración.	164
Figura 105.- Patrón de calibración adquiriendo temperatura.	164
Figura 106.- Tomas de la cámara para la calibración.	165
Figura 107.- Imágenes del procedimiento de calibración nº 1.	166
Figura 108.- Imágenes del procedimiento de calibración nº 2.	168
Figura 109.- Imágenes del procedimiento de calibración nº 3.	169
Figura 110.- Imágenes del procedimiento de calibración nº 4.	170
Figura 111.- Imagen mejorada con ThermaCAM Researcher Pro 2.10.	172
Figura 112.- Termografías preparadas para la composición de la sala 1.	173
Figura 113.- Composición termográfica de la sala 1.	173
Figura 114.- Termografías preparadas para la composición de la sala 2.	174
Figura 115.- Composición termográfica de la sala 2.	174
Figura 116.- Termografías preparadas para la composición de la sala 3.	175
Figura 117.- Composición termográfica de la sala 3.	175
Figura 118.- Termografías preparadas para la composición de la sala 4.	176
Figura 119.- Composición termográfica de la sala 4.	176
Figura 120.- Ortotermograma de la sala 1.	177
Figura 121.- Ortotermograma de la sala 2.	178
Figura 122.- Ortotermograma de la sala 3.	178
Figura 123.- Ortotermograma de la sala 4.	179
Figura 124.- Situación de las humedades en la planta de la Catedral.	180
Figura 125.- Imagen original infrarroja (IR).	182
Figura 126.- Imagen original en escala de grises.	182
Figura 127.- Imagen Blue (IR).	183
Figura 128.- Imagen Green (IR).	183
Figura 129.- Imagen Red (IR).	183
Figura 130.- Imagen binaria.	184
Figura 131.- Imagen truncada.	184
Figura 132.- Imagen con umbral a cero.	184
Figura 133.- Imagen procesada. Imagen procesada por división y mezcla de imágenes después del umbral.	185
Figura 134.- Imagen original.	185
Figura 135.- Imagen umbral 60.	186
Figura 136.- Isoterma, umbral 15.	186
Figura 137.- Isoterma, umbral 5.	186
Figura 138.- Ejemplo del cálculo de las desviaciones verticales.	189
Figura 139.- Método basado en la relación entre las luces y el diámetro.	190
Figura 140.- Método relación bóvedas-triángulo isósceles.	190
Figura 141.- Situación de los cortes de las plantas.	191
Figura 142.- Ortoimagen de la planta baja (01).	192
Figura 143.- Planta baja (01).	192
Figura 144.- Ortoimagen del nivel superior. Espacios anexos (02).	193
Figura 145.- Nivel superior. Espacios anexos (02).	193
Figura 146.- Ortoimagen del nivel ventanas de la nave principal (03).	194
Figura 147.- Nivel ventanas de la nave principal (03).	194

Figura 148.- Ortoimagen del bajo de la cubierta. Nave principal (04).....	195
Figura 149.- Bajo cubierta. Nave principal (04).....	195
Figura 150.- Ortoimagen de las cubiertas (05).	196
Figura 151.- Cubiertas (05).	196
Figura 152.- Ortoimagen de la sección norte.	197
Figura 153.- Sección norte.....	197
Figura 154.- Ortoimagen de la sección SL5.	198
Figura 155.- Sección SL5.	198
Figura 156.- Ortoimagen de la sección SL6.	199
Figura 157.- Sección SL6.	199
Figura 158.- Ortoimagen de la sección SL2.	200
Figura 159.- Sección SL2.	200
Figura 160.- Ortoimagen de la sección SL3.	201
Figura 161.- Sección SL3.	201
Figura 162.- Ortoimagen de la sección sur.	202
Figura 163.- Sección sur.	202
Figura 164.- Ortoimagen de la sección SL4.	203
Figura 165.- Sección SL4.	203
Figura 166.- Ortoimagen de la sección SL1.	204
Figura 167.- Sección SL1.	204
Figura 168.- Ortoimagen de la sección oeste.	205
Figura 169.- Sección oeste.....	205
Figura 170.- Ortoimagen sección oeste ST1.	206
Figura 171.- Sección oeste ST1.	206
Figura 172.- Ortoimagen sección oeste ST2.	207
Figura 173.- Sección oeste ST2.....	207
Figura 174.- Ortoimagen sección oeste ST3.	208
Figura 175.- Sección oeste ST3.....	208
Figura 176.- Ortoimagen sección este.	209
Figura 177.- Sección este.....	209
Figura 178.- Ortoimagen sección este ST1.	210
Figura 179.- Sección este ST1.....	210
Figura 180.- Ortoimagen sección este ST2.	211
Figura 181.- Sección este ST2.....	211
Figura 182.- Ortoimagen sección este ST3.	212
Figura 183.- Sección este ST3.....	212
Figura 184.- Numeración de las bóvedas.	213
Figura 185.- Ortoimagen sección bóveda 1.....	214
Figura 186.- Cálculo bóveda 1 con el método 1.....	214
Figura 187.- Cálculo bóveda 1 con el método 2.....	215
Figura 188.- Ortoimagen sección bóveda 2.....	216
Figura 189.- Cálculo bóveda 2 con el método 1.....	216
Figura 190.- Cálculo bóveda 2 con el método 2.....	217
Figura 191.- Ortoimagen sección bóveda 3.....	217
Figura 192.- Cálculo bóveda 3 con el método 1.....	218
Figura 193.- Cálculo bóveda 3 con el método 2.....	218
Figura 194.- Ortoimagen sección bóveda 4.....	219
Figura 195.- Cálculo bóveda 4 con el método 1.....	219
Figura 196.- Cálculo bóveda 4 con el método 2.....	220
Figura 197.- Ortoimagen sección bóveda 5.....	221

Figura 198.- Cálculo bóveda 5 con el método 1.....	221
Figura 199.- Cálculo bóveda 5 con el método 2.....	222
Figura 200.- Procedimiento geométrico para el cálculo de cotas en una bóveda.....	223
Figura 201.- Topografía teórica de las bóvedas.....	223
Figura 202.- Topografía real de las bóvedas. Intradós.....	223
Figura 203.- Topografía real de las bóvedas. Extradós.....	224
Figura 204.- Grietas de la fachada este de la Catedral.....	227
Figura 205.- Grietas de las bóvedas de la Catedral.....	228
Figura 206.- Grietas en el interior de la Catedral.....	228
Figura 207.- Grietas en el interior de la Catedral.....	229
Figura 208.- Sala del Archivo: termografía y termografía.....	229
Figura 209.- Antesala del Archivo: termografía y termografía.....	229
Figura 210.- Sala del Órgano: termografía y termografía.....	230
Figura 211.- Sala de entrada al Cuerpo del Archivo: termografía y termografía.....	230
Figura 212.- Bóveda 1.....	230
Figura 213.- Bóveda 2.....	231
Figura 214.- Bóveda 3.....	231
Figura 215.- Bóveda 4.....	231
Figura 216.- Bóveda 5.....	232
Figura 217.- Topografía real de las bóvedas.....	232
Figure 218.- Cracks in the eastern façade of the cathedral.....	235
Figure 219.- Cracks in the domes of the cathedral.....	236
Figure 220.- Cracks in the cathedral interior.....	236
Figure 221.- Cracks in the cathedral interior.....	237
Figure 222.- Main Archive: thermography and thermography.....	237
Figure 223.- Archive reception room: thermography and thermography.....	237
Figure 224.- Organ room: thermography and thermography.....	238
Figure 225.- Entrance hall of the Main Archive: thermography and thermography....	238
Figure 226.- Dome 1.....	238
Figure 227.- Dome 2.....	239
Figure 228.- Dome 3.....	239
Figure 229.- Dome 4.....	239
Figure 230.- Dome 5.....	240
Figure 231.- Real topography of the domes.....	240

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Grado de estabilidad de taludes.	61
Tabla 2.- Tipos de láser escáner (elaboración propia).....	84
Tabla 3.- Bandas de longitud de onda (elaboración propia).....	88
Tabla 4.- Coordenadas calculadas.	100
Tabla 5.- Coordenadas ajustadas.	101
Tabla 6.- Coordenadas ajustadas.	101
Tabla 7.- Resultados comparativos de 2012 y 2013.....	101
Tabla 8.- Datos de la nivelación geométrica.	105
Tabla 9.- Resumen de datos básicos.....	109
Tabla 10.- Resumen de datos básicos.....	110
Tabla 11.- Valores de los ensayos SPT de Vorsevi.....	118
Tabla 12.- Resultados del F.S. con diferentes métodos de cálculo.	133
Tabla 13.- Resultados del F.S. con diferentes métodos de cálculo.	141
Tabla 14.- Resultados del F.S. con diferentes métodos de cálculo.	145
Tabla 15.- Resumen de todas las hipótesis.	146
Tabla 16.- Pendiente media de los perfiles.....	147
Tabla 17.- Resultados alineación de las nubes de puntos.....	152
Tabla 18.- Parámetros de transformación de la alineación de nubes de puntos.	152
Tabla 19.- Características de las nubes de puntos.	153
Tabla 20.- Resultados de la transformación de coordenadas.....	156

PARTE I: MARCO REFERENCIAL

1.- Marco referencial.-

1.1.- Introducción.-

A lo largo de los siglos ha ido conformándose en España un amplio patrimonio histórico, en el que la acción del tiempo se ha manifestado a través de diversas anomalías como pueden ser grietas o humedades.

Esta situación requiere un análisis de los edificios y monumentos afectados para trazar un plan de conservación que permita preservar todo el patrimonio español. Para realizar este análisis, el uso de técnicas no destructivas es, posiblemente, una de las mejores alternativas, puesto que no suponen ningún daño ni contacto físico con dicho patrimonio.

Las técnicas no destructivas empleadas en esta tesis son, el levantamiento topográfico mediante la técnica de láser escáner y la utilización de la termografía.

El láser escáner es capaz de efectuar levantamientos topográficos de una forma rápida y eficaz de estructuras con una precisión milimétrica. Además, es una técnica muy útil para generar levantamientos tridimensionales de edificios de gran tamaño o de difícil acceso. Al generar un modelo tridimensional permite identificar fallos estructurales, como grietas o fisuras. Posteriormente, se pueden generar planos en 2D que permitan representar la geometría real de los edificios.

Con la termografía se captan imágenes de calor que representan la distribución superficial de temperaturas en el elemento analizado, permitiendo reconocer, en tiempo real, dónde se localizan las zonas húmedas. Es una técnica capaz de analizar zonas inaccesibles y, finalmente, realiza el análisis sin contacto físico con el edificio.

La superposición del modelo tridimensional generado por el láser escáner con los datos termográficos permite cuantificar las dimensiones de aquellas humedades que están deteriorando el edificio.

La combinación de las técnicas de láser escáner y termografía se están convirtiendo en una herramienta muy útil para realizar análisis estructurales en edificios y monumentos pertenecientes al patrimonio histórico, y sobre todo, para aquellas construcciones con superficies complejas y con estructuras de gran tamaño.

El deterioro que sufre la Catedral podría ser debido a la inestabilidad de la ladera sobre la que se asienta. Por ello, se realiza un estudio de la estabilidad de la ladera para saber si cederá y en qué condiciones lo hará. También se controla el movimiento de las zonas circundantes a la Catedral mediante una red geodésica establecida con GPS y nivelación.

La Catedral de Santa María de la Asunción de Coria, declarada Monumento Nacional en junio del año 1931, se encuentra situada en el extremo suroeste de la ciudad. La fachada sur se eleva sobre un talud del río Alagón, y el resto de fachadas conectan con la ciudad por medio de plazas que se encuentran a diferentes niveles.

La Catedral de Coria, es un edificio con una larguísima historia que puede remontarse hasta época romana, pero cuya construcción tal y como la conocemos se realiza en el

intervalo de finales del siglo XV hasta mediados del siglo XVIII. Posteriormente no se realizan obras de importancia hasta mediados del siglo XX. En este intervalo se suceden catástrofes terribles que arruinan partes de importancia del edificio, y episodios de ruina, agrietamientos y fuertes deformaciones.

Tras la realización de un Plan Director en el año 2003, durante el cual se realizaron diversos ensayos, mediciones e investigaciones, se ha detectado que el edificio sufre un estado general de lesiones bastante fuertes, que en determinados puntos hace temer por la estabilidad estructural, grietas en el muro este y en algunas bóvedas de la nave central, así como en la zona del archivo, donde también se localizan las humedades.

En principio es fundamental desarrollar la investigación científica y conocer de manera exacta cuales son las condiciones del edificio en los diversos campos de actuación, para tomar soluciones definitivas.

1.2.- Objetivos.-

El objetivo general que persigue la ejecución de esta tesis doctoral es la aplicación de técnicas geodésicas y la combinación de las técnicas de láser escáner y termografía para realizar el estudio patológico de la estructura y cimentación de la Catedral de Coria, para que posteriormente otras disciplinas puedan diagnosticar los fallos estructurales localizados e intenten subsanarlos.

El objetivo general se desglosa en los siguientes objetivos específicos:

- 1.- Establecer una red geodésica y una red de nivelación geométrica de precisión para conocer el comportamiento de la base sobre la que se asienta la edificación.
- 2.- Comprobar con el programa Geo-Studio, con datos geológicos y geotécnicos obtenidos por proyectos anteriores, un posible deslizamiento del talud situado al sur de la Catedral.
- 3.- Proponer una metodología eficaz de campo con el láser escáner y la cámara térmica, con un grado de fiabilidad y en tiempo reducido.
- 4.- Elaborar una metodología para la integración de los datos obtenidos del láser escáner y la cámara térmica.
- 5.- Detectar aquellas zonas del edificio afectadas por humedades con el desarrollo de un nuevo programa informático para poder ver las isoterms.
- 6.- Localizar las desviaciones verticales y las deformaciones de las bóvedas a partir de un estudio geométrico con las ortoimágenes obtenidas.

La importancia de esta tesis doctoral estriba en la combinación de dos tecnologías que hasta ahora funcionaban de forma independiente: la tecnología de láser escáner y la termografía. Es de suma importancia que, gracias a las propiedades métricas del láser escáner, se pueda situar geoméricamente y cuantificar de manera eficaz zonas afectadas por anomalías que han sido captadas por una cámara termográfica. Por lo tanto es de vital importancia elaborar una metodología de trabajo que permita aunar ambas tecnologías de manera fiable y en tiempo reducido.

1.3.- Estructura de la tesis.-

La tesis doctoral se ha estructurado en cinco partes.

La primera parte es el marco referencial de la tesis, en la que se incluyen dos capítulos (1 y 2). En el primer capítulo se hace una introducción, y se presentan los objetivos y la estructura de la tesis; el segundo capítulo realiza una reseña histórica de la Catedral de Coria.

La segunda parte aborda el estado del arte en cuestión (capítulo 3), haciendo una revisión de las diversas publicaciones técnicas que presentan trabajos afines a los empleados en esta tesis doctoral.

La tercera parte trata del marco teórico en el que se basa todo el trabajo posterior. Consta de cuatro capítulos (4, 5, 6 y 7). El cuarto capítulo de la tesis presenta la situación actual de los sistemas GNSS, que serán utilizados para el establecimiento de la red de control posicional tridimensional. El quinto capítulo expone los conceptos básicos de geotecnia para, posteriormente, elaborar una metodología de trabajo en el estudio del control de estabilidad del talud. El sexto y séptimo capítulos presentan los fundamentos teóricos de las técnicas de láser escáner y termografía respectivamente.

La cuarta parte expone la metodología de trabajo realizada, en seis capítulos (8, 9, 10, 11, 12 y 13). El octavo capítulo describe la red de control tridimensional, el noveno el control de estabilidad del talud, el décimo la tecnología de láser escáner, el undécimo la tecnología termográfica, el duodécimo el programa informático desarrollado para detectar las humedades y visualizar isotermas, y el décimotercero el estudio geométrico de la catedral.

La quinta parte presenta las conclusiones y las futuras líneas de investigación.

2.- Evolución histórica de la Catedral.-

2.1.- Descripción de la Catedral.-

La Catedral es un suntuoso conjunto histórico-artístico, declarada Monumento Nacional el 3 de junio de 1931 (García, 1999). Está formada por un claustro al norte, una torre de planta cuadrangular situada al oeste del claustro y el archivo catedralicio al sur (Figuras 1 y 2).



Figura 1.- Fachada norte de la Catedral (elaboración propia).

La planta de la iglesia es rectangular, no tiene ni ábside ni crucero, con algunas capillas laterales. En su alzado presenta bóvedas de crucería estrellada sobre pilares adosados al muro, con cinco bóvedas cubriendo la nave central (Figura 3). Para contrarrestar los empujes de estos pilares, se contraponen gruesos contrafuertes (Jurado, 2013).



Figura 2.- Fachada sur de la Catedral (elaboración propia).

La torre tiene tres cuerpos en altura, vanos para campanas en el superior y está coronada por una cornisa, balaustrada y pináculos, cerrándose con una bóveda de medio punto y una linterna como remate (Jurado, 2013).



Figura 3.- Interior de la Catedral (elaboración propia).



Figura 4.- Fachada oeste de la Catedral (elaboración propia).

Destacan dos portadas, sobre todo la portada del Oeste (Figura 4) es la de mayor relevancia. Es de estilo plateresco (García, 1999).

2.2.- Historia constructiva.-

El texto e imágenes de este apartado se han extraído del libro *La Catedral de Coria, Arcón de Historia y fe*, del Catedrático D. Florencio Javier García Mogollón.

2.2.1.- Época medieval.-

No se han conservado restos de la que fue la catedral visigótica ni tampoco de la mezquita árabe que se edificó en época musulmana.

La escritura fundacional de la catedral, que recibió el título de Santa María, es el privilegio del 30 de agosto de 1142, concedido en Burgos por Alfonso VII a Íñigo Navarrón y confirmado por Alfonso X en Sevilla el 30 de abril de 1261.

Se ignora como era este primitivo templo ya que no se han conservado restos, tan sólo unas breves referencias documentales.

2.2.2.- Primera fase de la construcción (1496-1530).-

La catedral medieval era pequeña e insuficiente para desarrollar las ceremonias litúrgicas y acomodar a los fieles. Por eso, el cabildo se empeñó en levantar un nuevo templo, de mayores dimensiones, que sirviera mejor para esos fines.

Se eligió para construir la nueva catedral al arquitecto Martín de Solórzano que presentó una traza en 1496, hoy perdida. Martín de Solórzano con la colaboración de su hermano Bartolomé levantó la capilla mayor y la bella portada gótica del lado del Evangelio entre los años 1496 y 1502.

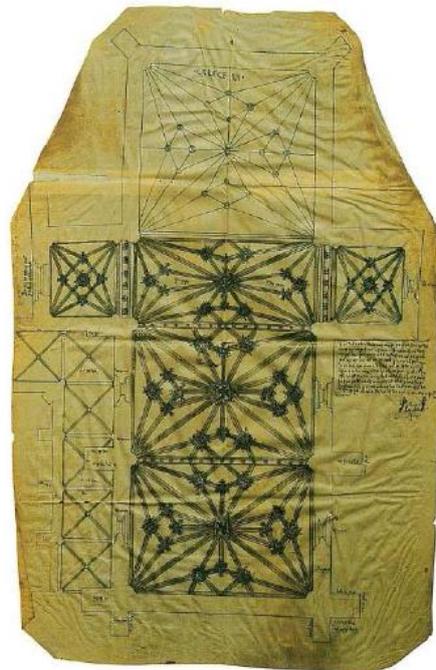


Figura 5.- Pergamino del maestro Bartolomé de Pelayos, 1503 (García, 1999).

En 1503 es el arquitecto Bartolomé de Pelayos el que se hace cargo de la obra presentando una traza en pergamino (Figura 5). Pelayos se comprometió a levantar el crucero con bóveda de crucería y once claves, según indica en su traza, y los correspondientes estribos que también ayudarían a sustentar la capilla mayor. Tenía que levantar, además, la capilla de la Anunciación, tres altares y otras dos capillas.

Pero Bartolomé de Pelayos no realizó la totalidad de la obra, debido a su fallecimiento, ocurrido a comienzos del año 1504, y enseguida se hizo cargo de la contrata Sebastián de Lasarte pero siguiendo los planes ya establecidos por Pelayos en su traza. Más tarde, cuando falleció Lasarte le sucedió su hijo en la dirección de las obras, terminándose la capilla que continuaba a la del crucero y los muros del coro actual.

2.2.3.- Segunda fase constructiva (1530-1547).-

En 1530 Juan de Álava proporcionó los diseños iniciales para la capilla que ampliaba el templo y que remataría en la magnífica portada renacentista, que comenzó a construir el arquitecto Esteban de Lazcano. Éste, además de trabajar en la capilla nueva y el sagrario, también empezó a construir la torre nueva de la Catedral.

2.2.4.- Tercera fase constructiva (1547-1570).-

Tras la muerte de Esteban de Lazcano el cabildo buscó un nuevo arquitecto que rematara las obras, nombrando a Pedro de Ibarra. Bajo su dirección, en 1548, estaban colocadas las cimbras de la capilla nueva y un año más tarde se cubrían los tejados de dicha capilla.

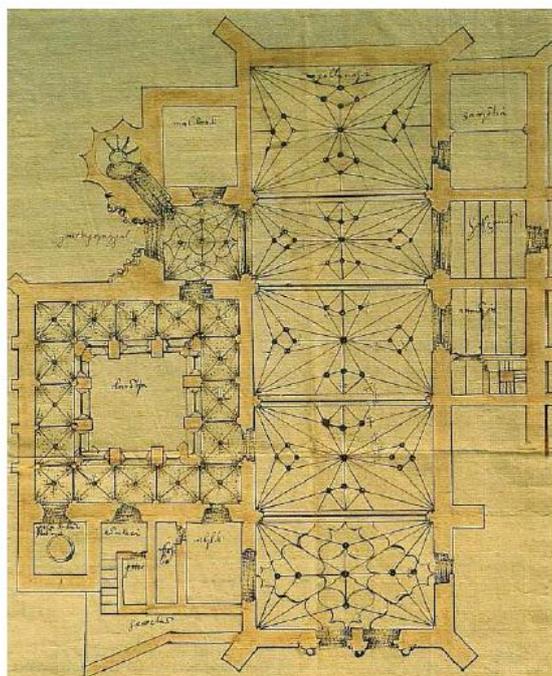


Figura 6.- Planta de la Catedral, 1560 (García, 1999).

La alegría del cabildo por la terminación de la nave fue corta, ya que a finales de noviembre de 1550 las capillas y el sagrario presentaban deficiencias porque los cimientos se inundaban de agua y dañaban la estructura. Debido a la gravedad del asunto se envió un aviso al arquitecto Rodrigo Gil de Hontañón para que estudiara el

caso y diera con un remedio, pero fue Juan de Álava, padre de Pedro de Ybarra, el que ideó un primer remedio de enlosados y caños de agua para solucionar el problema de la humedad.

Se sabe que con posterioridad al año 1552 la sacristía y las bóvedas de la capilla mayor y crucero se desmontaron y levantaron de nuevo.

En 1553 se realizó el ventanal de la fachada occidental, y poco más tarde, en los muros del coro, sus extraordinarios entablamentos manieristas y las esculturas y ménsulas del trascoro y de la parte frontal.

Está documentado que en 1563 las obras de la capilla mayor y el crucero están terminadas, y el cabildo ordenó colocar una cubierta de bóveda en la capilla de la Inmaculada, haciendo en la parte alta una estancia para el capítulo.

Los avances en la construcción de la catedral se pueden observar en las trazas de su planta (Figura 6).

2.2.5.- Cuarta fase constructiva (1570-1646).-

En febrero de 1575 se apreciaron deficiencias en el edificio de nuevo. El arquitecto Pedro López, opinaba, como otros peritos anteriores, que los males de la Catedral procedían de los delgados y débiles cimientos y del daño que en ellos hacían las aguas; además, pensaba que las bóvedas estaban en mal estado porque estaban cargadas de cosas innecesarias y la solución sería cimbrarlas para desmontarlas y volverlas a colocar elevando más las claves, como había dicho ya Ybarra hacía años.

Como consecuencia de todo ello, se empezó a cimbrar quizá la bóveda de la capilla mayor en diciembre de 1574. Juan Bravo hizo la mayor parte de las reparaciones.

El 2 de junio de 1597 Juan del Ribero Rada, maestro mayor de la Catedral de Salamanca, presentó sus condiciones y trazas para rematar la obra de la sacristía y antesacristía (iniciadas por Juan Bravo para refuerzo de la capilla mayor), derribando la vieja y su bóveda, y para construir el paredón del barranco y mirador, haciendo, además, una alcantarilla alrededor del templo que recogiera las aguas de lluvia, trabajos que no se realizaron entonces.

En enero de 1627 debía de estar ya terminada la sacristía nueva, puesto que se encargó al carpintero Francisco García una cajonería para ella, y en septiembre del mismo año se colocaron las rejas de las ventanas.

2.2.6.- Las obras del siglo XVIII.-

En 1707 las tropas del Archiduque Carlos entraron en Coria y causaron daños en la Catedral, sobre todo en los tejados y bóvedas; para repararlos se llamó al arquitecto agustino descalzo fray Gabriel de San Patricio.

Las últimas obras realizadas antes del terremoto de 1755 fueron las de la torre y coronamiento de balaustres y pirámides, aún visibles en lo alto de los muros. Las

condiciones para la terminación de la torre se encomendaron al famoso arquitecto Manuel de Larra y Churriguera, que también dirigió los trabajos (Figura 7).



Figura 7.- Alzado de la torre catedralicia. 1732 (García, 1999).

El 29 de enero de 1735, por el peligro de cargar tanto peso en los muros del ábside, fray José Fernández diseñó, de acuerdo con Churriguera, un gran arco de descarga en el lateral del ábside -visible en la estancia que hay bajo las campanas, en el cuarto del reloj- y la portada de acceso a la actual capilla de la Inmaculada.

En abril de 1739 se colocó la cruz y bola de hierro del remate de la torre, dorada por Bernardo Carpentano, y el cerrajero Juan Arias Lancho añadió la hermosa veleta diseñada por Ignacio Lordelo, restaurada tras el terremoto por Francisco Bonilla.

En los inicios de la década de 1740 se trabajaba en el enlosado del trascoro y claustro.

2.2.7.- El terremoto de 1755 y sus consecuencias.-

El terremoto acaecido el 1 de noviembre de 1755 causó graves daños en la Catedral. Arruinó parte de la majestuosa torre (sobre todo la linterna y cúpula) y de la capilla del Santísimo, se hundió la bóveda de la capilla mayor, destrozándose la parte alta del retablo nuevo, rejas y púlpitos; se cayó también parte de la bóveda del cuerpo de la iglesia, sobre todo la del crucero, que, con gran riesgo, hubo de apuntalarse con un muro terminado el 30 de julio de 1756; se vinieron abajo pirámides y balaustres de los coronamientos que, en su caída, afectaron a la sacristía baja y a las bóvedas del claustro.

El 19 de noviembre de 1756, un año después del desastre, se habían asegurado, aunque no acabado de reparar, algunos desperfectos de la Catedral, pero faltaban por cubrir la capilla mayor y la torre, para lo cual llamaron a Pedro Sánchez Lobato, que fue el arquitecto que se encargó inicialmente de ello. El arquitecto Ventura Arauja terminó estos trabajos.

Finalmente, el 3 de marzo de 1758 se doraba la clave de la bóveda por Francisco Sánchez. En la misma fecha acordó el cabildo realizar la media naranja y linternillo que culminan la torre, con su cubierta de pizarras, obras dirigidas por Ventura Arauja.

2.2.8.- Desde 1758 a la actualidad.-

No existe bibliografía que documente los trabajos arquitectónicos en la Catedral de Coria a partir de 1758.

PARTE II: ESTADO DEL ARTE

3.- Estado del Arte.-

3.1.- Introducción.-

A continuación se realiza una revisión de las diversas publicaciones técnicas que presentan trabajos afines a los empleados en esta tesis doctoral. Ninguno de ellos utiliza todas las técnicas desarrolladas en esta tesis, la documentación ha servido para conocer el actual estado del arte aplicado al análisis del patrimonio.

3.2.- Estudios geotécnicos aplicados a la protección del patrimonio.-

- El libro titulado “*Landslides Disaster Risk Reduction*” (Canuti et al., 2009), en su capítulo 22, titulado “*Cultural Heritage and Landslides: Research for Risk Prevention and Conservation*”, analiza, desde un punto de vista general, la conservación del patrimonio. Se presentan diferentes casos de deslizamientos de tierras asociados al patrimonio cultural y refleja la multitud de intereses asociados a estos temas.

El primer caso, “*Landslide Process Activization on Sites of Cultural Heritage in Moscow, Russia*”, expone los riesgos de las construcciones ubicadas en las orillas del río Moscova a su paso por Moscú y analiza las distintas laderas.

El segundo caso se titula “*Environmental Hazards: The Result of Engineering Geological Failures on Cultural Heritage*”. Destaca que la mayoría de los daños producidos en estructuras históricas se debe a cambios en el entorno geológico. Existen otros tipos de causas como son: deslizamientos de tierra provocados por un terremoto, erosión de un río o el arrastre de la lluvia. Varios de estos ejemplos se pueden contemplar en Eslovaquia (Vlcko, 1999). Se analiza la ciudad de Banska Stiavnica, en la que se destaca la ubicación de minas alrededor de edificios del patrimonio histórico y, a esto, se añaden las desfavorables condiciones geológicas. Posteriormente, se estudia el castillo de Spis (Eslovaquia), donde se comprueba la degradación de su castillo debido a factores geológicos y humanos (Vlcko, 2004).

El objetivo del tercer caso donde se aplican técnicas geotécnicas es, “*Effects of Landslides on Machu Picchu Cultural Heritage*”, donde se conforman el entorno geológico y geomorfológico. Se estudian los patrones de deformación geológica y geomorfológica relacionando la causalidad entre los riesgos geomorfológicos naturales y los procesos antropogénicos (cuevas subterráneas, hundimientos locales,...).

En el cuarto caso, “*Risk Mitigation from Landslides for Cultural Heritage in Umbria Region: Some Applications*”, en la región italiana de Umbría, existe un riesgo de deslizamientos de tierras e inestabilidades hidrogeológicas causadas por el establecimiento de ciudades alrededor de castillos, torres o pueblos medievales situados en las partes superiores de las colinas. Ante esta situación, el gobierno regional de Umbría aprobó 41 leyes para intentar consolidar la inestabilidad de las ciudades.

En el quinto caso, “*Support of Poliphimos Cave in Maronia (Thrace, Greece)*”, en una cueva de gran interés turístico por sus famosas estalactitas, propone un método de estabilidad en la cueva y para ello se recogen datos tectónicos.

El siguiente caso es, “*Rockfall Hazard and Risk for a High Promontory: Monemvasia Historical Site, Greece*”. Monemvasia es un lugar histórico situado en la península del Peloponeso. Los fenómenos de inestabilidad representan una amenaza para las zonas ubicadas justo debajo de la pendiente ya que, en el pasado, se produjeron desprendimientos de rocas. Toda la zona se cartografió con estaciones totales sin prisma y el resultado fue un MDT. Con el fin de investigar las condiciones de inestabilidad y tomar una decisión para estabilizar la zona, se realizan varias secciones y se les somete una carga. El resultado es un mapa que representa aquellas áreas que tienen un alto riesgo de desprendimiento de rocas.

El último caso se titula “*Geomorphology and Landslide Potential of the Bamiyan Valley (Afghanistan)*”. Es un valle conocido por la destrucción de dos Budas gigantes por los talibanes en marzo de 2001. Se hace un estudio de campo geomorfológico para reconstruir los principales procesos geomorfológicos activos a lo largo de la zona de los acantilados. Se elabora un estudio geomorfológico, geotécnico y estructural y se analizan diecisiete secciones del acantilado donde los procesos geológicos son más prominentes.

- El artículo “*UNESCO World Heritage sites in Italy affected by geological problems, specifically landslide and flood hazard*”, pone de manifiesto el peligro de desprendimientos sobre monumentos históricos en Italia. El Consejo Nacional de Investigación y el Instituto de Investigación para la Protección Hidrogeológica (IRPI) han elaborado un estudio sobre los monumentos italianos incluidos en la Lista del Patrimonio Mundial de la UNESCO. Este estudio advierte que muchos monumentos se ven afectados por problemas geológicos, geomorfológicos y problemas de ingeniería. Estos monumentos son entidades estáticas situadas en un entorno en el que a menudo se manifiestan procesos altamente dinámicos. Con el fin de proteger el patrimonio cultural y natural, este estudio ha aplicado un método basado en los Sistemas de Información Geográfica. El estudio se centra en los ríos y laderas de montañas dinámicas, concretamente en los deslizamientos de tierra e inundaciones (Lollino y Audisio, 2006).

- El artículo, titulado: “*Landslide Risk Assessment and Disaster Management in the Imperial Resort Palace of Lishan, Xian, China*” investiga los peligros de deslizamiento en el antiguo complejo imperial del palacio de Lishan, Xian, China. Se instalan dos líneas de trece extensómetros. Se prueba la existencia de deformaciones, y los datos que se obtuvieron alertaron al gobierno chino para instalar medidas de prevención en los deslizamientos de tierras. El desarrollo del sistema de monitoreo en tiempo real permitió predecir un posible movimiento de tierras (Fukuoka et al., 2005).

- El artículo: “*Analysing the possible impact of landslides and avalanches on cultural heritage in Upper Svaneti, Georgia*”, estudia la vulnerabilidad de sesenta objetos del patrimonio cultural. El principal objetivo de este estudio es evaluar el posible impacto de los deslizamientos de tierra y avalanchas de nieve en los sitios del patrimonio cultural de dos comunidades (Ushguli y Mulakhi), en la región del Alto Svaneti en Georgia. La metodología utilizada se compone de tres partes interconectadas. La primera parte se refiere a la evaluación del estado de conservación de los objetos del patrimonio cultural, basada en encuestas y análisis SIG. La segunda parte se ocupa de la evaluación de múltiples peligros de la zona de estudio, basada en la Evaluación Multicriterio Espacial (SMCE). La tercera parte se ocupa del análisis de los planes de gestión de patrimonio cultural existentes, y sirve para dar orientación a las autoridades

acerca de los peligros existentes y realizando una evaluación de riesgos. Esta metodología, aunque de naturaleza básica, se considera que es adecuada sobre todo porque se puede llevar a cabo por personas no expertas en el ámbito de la gestión de desastres y donde los datos sobre el patrimonio cultural son escasos (Alcaraz et al., 2012).

- Otros artículos, que analizan el patrimonio desde un punto de vista geotécnico son: “*Geological risk assessment for cultural heritage conservation in karstic caves*” (Iriarte et al., 2010); “*Flood hazard threat on cultural heritage in the town of Genoa Italy*” (Lanza, 2003); “*Geological risk assessment of the area surrounding Altamira cave: a proposed natural risk index and safety factor for protection of prehistoric caves*” (Sánchez et al., 2007); “*Identifying geological and geotechnical influences that threaten historical sites: a method to evaluate the usefulness of data already available*” (Gizzi, 2008).

3.3.- Estudios sobre levantamientos tridimensionales.-

Existe una gran variedad de proyectos y artículos relacionados con la obtención de levantamientos tridimensionales, mediante el empleo del láser escáner, entre estos estudios destacan:

- A partir del siglo XIX se empezó a catalogar el patrimonio, los bocetos se complementaron con estudios topográficos e informes ilustrados. Posteriormente, se emplearon las técnicas discretas como la estación total, las cuales han quedado en un segundo plano, dando paso a los instrumentos de adquisición de datos masivos como el láser escáner y la fotogrametría digital. Los SIG enlazan información alfanumérica con representaciones gráficas lo que permite simplificar los análisis y los datos para la catalogación del patrimonio. Este análisis se hace en el artículo titulado: “*Evolution of the architectural and heritage representation*” (Núñez y Buill, 2009).
- El artículo titulado: “*Generation of virtual models of cultural heritage*” (Núñez et al., 2012) explica cómo se puede obtener un buen resultado combinando dos técnicas: fotogrametría y láser escáner. En la actualidad, existen diferentes metodologías para representar objetos, edificios o ciudades. Para la generación de estos elementos, los métodos tradicionales como la topografía clásica no sirven, se necesita una metodología que permita la captura masiva de puntos en tres dimensiones. La fotogrametría y el láser escáner combinados con la fotografía convencional proporcionan información del objeto, además de su geometría. El estudio lleva a cabo una revisión de las diferentes técnicas que muestran sus ventajas y desventajas, así como la información que se puede obtener mediante la aplicación de estas técnicas para el estudio de la gran puerta de Antioquía en la ciudad de Alepo, declarada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en 1986.
- El artículo: “*Terrestrial laser scanning intensity data applied to damage detection for historical buildings*” (Armesto et al., 2010) combina la información tridimensional con la información de intensidad del láser escáner para diagnosticar patologías. Este trabajo presenta una metodología que combina la tecnología del láser escáner terrestre con las técnicas de procesamiento digital de imágenes. El objetivo es estudiar los daños en los materiales pétreos que constituyen los edificios históricos. La

metodología prueba el uso de datos de intensidad de tres láseres escáner diferentes. Los algoritmos de clasificación no supervisados son utilizados para la clasificación de las imágenes de intensidad 2D derivados de la información obtenida de los equipos 3D láser escáner. Los resultados obtenidos resaltan el potencial de la utilización de los datos de intensidad del láser escáner terrestre para el reconocimiento y la caracterización de ciertas patologías en los edificios históricos.

- “*Modeling the thickness of vaults in the church of Santa Maria de Magdalena (Valencia, Spain) with laser scanning techniques.*” (Herráez et al., 2013), Este trabajo muestra el cálculo del espesor de las bóvedas de una iglesia. Determina la geometría 3D de interiores y exteriores de la iglesia utilizando el láser escáner. Mediante la combinación de ambas geometrías (intradós y extradós), es fácil determinar la diferencia entre las bóvedas interiores y el techo de la iglesia. Este trabajo muestra los métodos utilizados para determinar las secciones interiores de los espesores utilizando un sistema de plomada. Los resultados obtenidos muestran una precisión mayor a los 6 milímetros.

Existen otros artículos interesantes relacionados con el láser escáner.

- Gestión eficiente de nubes de puntos: Actualmente los láseres escáner son capaces de tomar una gran cantidad de información en espacios de tiempo muy reducidos. El manejo de esa información al completo resulta muy difícil, es casi inviable trabajar con una nube de mil millones de puntos. Se están desarrollando algoritmos tipo “octree” para el manejo de tal cantidad de información. Estos algoritmos proponen almacenar y comprimir de una forma eficiente los datos en 3D sin pérdida de precisión (Elseberg et al., 2013). La aparición de nuevos algoritmos está a la orden del día, destacando los que identifican y modelan aquello para lo que están programados (Xiong et al., 2013).
- Auscultación de presas, puentes y túneles. Hace unos años era inviable poder auscultar una presa o un puente con un láser escáner, ya que no alcanzaban las precisiones requeridas. Actualmente, esos inconvenientes para algunos casos, ya están superados (Riveiro et al, 2013) (Wu et al., 2013).
- Automatización en la calibración de un láser escáner: Los errores sistemáticos del láser escáner son corregidos por el fabricante antes de la entrega, sin embargo los errores geométricos no. Se ha desarrollado una calibración automática que corrige la geometría permitiendo obtener una nube más precisa (García y Lerma, 2013).

3.4.- Estudios sobre técnicas termográficas.-

El desarrollo de técnicas no destructivas y sin contacto es de suma importancia para conservar el patrimonio.

- Un artículo en el que se hace un estudio termográfico del patrimonio cultural en L'Aquila, es: “*Preventive thermographic diagnosis of historical buildings for consolidation*”. La termografía Infrarroja (IR) es una técnica no destructiva muy poderosa para dar diagnósticos rápidos y precisos de los edificios. Se hizo una campaña de datos termográficos del patrimonio histórico cultural en la zona de L'Aquila y sus alrededores. En este trabajo se presentan los resultados del estudio para la Iglesia de

Santa Maria ad Cryptas (siglo XIII), uno de los edificios más antiguos y uno de los mejores ejemplos de arte gótico en los Abruzos. El objetivo era evaluar la correspondencia entre los daños sufridos por el terremoto del año 2009 y los resultados termográficos anteriores al terremoto, con el fin de validar la eficacia de la termografía y su papel en el diagnóstico preventivo (Paoletti et al., 2013).

- *“Integration of active thermography into the assessment of cultural heritage buildings”* (Maierhofer et al., 2010). Las aplicaciones de la termografía infrarroja en la ingeniería civil no sólo se limitan a la identificación de pérdidas de calor en la construcción. Los métodos de termografía infrarroja activa permiten investigaciones estructurales de elementos en la construcción con una profundidad de unos 10 cm. Los elementos de albañilería y mampostería histórica tienen una estructura muy heterogénea que contiene diferentes materiales (ladrillo, piedra, mortero, yeso, madera, metales, etc) cada uno con propiedades térmicas diferentes. Muchos daños se originan cerca de la superficie, los cuales son capaces de detectarse con la termografía activa. Este trabajo, estudia el fondo físico, equipamiento, influencias ambientales y las propiedades del material. Se presentan varios resultados de la aplicación y se demuestra cómo la termografía activa se puede integrar para evaluar las estructuras históricas.

- El artículo: *“Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures”* (Avdelidis y Moropoulo, 2004). Utiliza la termografía para evaluar los materiales y la estructura de las zonas patrimoniales. Este documento contiene un resumen de la termografía infrarroja y sus aplicaciones en relación con la investigación de las estructuras históricas. Se utiliza esta técnica no destructiva para la evaluación de diversos materiales y estructuras tradicionales del edificio histórico después de haber sido conservado, restaurado o reparado utilizando diversos tratamientos. Se hicieron termografías de materiales y estructuras con el fin de evaluar el comportamiento fisicoquímico de los tratamientos de conservación, tales como la limpieza de la piedra, su consolidación, morteros de reparación, todo ello para revelar las características del sustrato. Se calculan los valores de emisividad de los materiales. El resultado de este trabajo proporciona una fuerte evidencia de que la termografía infrarroja es una técnica eficaz para la evaluación de edificios y sitios históricos.

- También pueden emplearse dos técnicas no invasivas de manera complementaria, de manera que el artículo *“Infrared thermography and Georadar techniques applied to the “Sala delle Nicchie” (Niches Hall) of Palazzo Pitti, Florence (Italy)”* (Imposa, 2010) emplea la termografía infrarroja y el georadar. El objetivo de este trabajo es verificar que la configuración arquitectónica original del Salón del Palacio Pitti es como describen los planos de 1700. Este documento muestra que la "Sala delle Nicchie" se documentó en 1700 con diez nichos en lugar de los seis que son visibles hoy en día. Tanto la termografía infrarroja como el georadar confirman la presencia y la ubicación de los nichos como se indica en la planimetría de 1700. Los resultados de este estudio demuestran la importancia y el beneficio del uso de técnicas no destructivas en los sitios de interés artístico e histórico.

3.5.- Estudios sobre la calibración geométrica de la cámara.-

- El primer paso para unir la imagen termográfica a la nube de puntos es calibrar geoméricamente la cámara. Sobre esta temática no hay mucho escrito, existe el artículo

“*Calibration and verification of thermographic cameras for geometric measurements*” (Lagüela et al., 2011) donde para calibrar la cámara térmica utiliza un tablero lleno de bombillas y esferas y cuadrados de distintos tamaños.

3.6.- Estudios sobre la combinación de las técnicas de láser escáner y termografía.-

- Hay varios artículos que exponen la metodología, la mayoría y más relevantes pertenecen a Lagüela. El primero de ellos, publicado en 2011, titulado: “*Energy efficiency studies through 3D laser scanning and thermographic technologies*” (Lagüela et al., 2011), donde explica la metodología seguida para llevar a cabo el proceso. A continuación, el artículo “*Automation of thermographic 3D modelling through image fusion and image matching techniques*” (Lagüela et al., 2012) explica otra metodología, en la que prescindiendo del láser escáner, genera un modelo 3D termográfico a través de la fusión de imágenes térmicas y la geometría que ofrecen las imágenes visibles.

3.7.- Estudios sobre documentación geométrica.-

El Comité Internacional de Fotogrametría Arquitectónica (CIPA) realiza actividades avaladas por ICOMOS e ISPRS. Entre estas actividades destacan diferentes congresos, donde hay una gran variedad de artículos referentes a la documentación geométrica del Patrimonio. A continuación se muestran algunos ejemplos:

- “*Geometric characterization of a cylinder-shaped structure from laser scanner data: Development of an analysis tool and its use on a leaning bell tower*” (Teza y Pesci, 2013). Consiste en el estudio de un campanario inclinado de estilo románico-bizantino con 1000 años de antigüedad en Caorle (Provincia de Venecia, Italia). Es una estructura única, caracterizada por ventanas ojivales individuales y dobles, distribuidas armónicamente en un eje en forma de cilindro, todo coronado por una cúspide cónica. El levantamiento se hace con láser escáner terrestre (TLS), posteriormente se analiza la nube de puntos resultante para proporcionar los siguientes datos: el campanario está inclinado, las paredes están inclinadas y el radio de la torre se estrecha. Existen desviaciones locales por la forma circular del monumento. Estas desviaciones se acentúan con la elevación. Los análisis se desarrollan con MATLAB y Octave. El resultado es una geometría fiable de la torre del campanario. Se establece una relación entre el ángulo de inclinación (valor medio 1,4°) y algunas deformaciones de la superficie. También existen daños (abolladuras, desplazamientos de ladrillo y pérdida de material).

- “*Laser scanning the Garisenda and Asinelli towers in Bologna (Italy): Detailed deformation patterns of two ancient leaning buildings*” (Pesci et al., 2011). Las torres Asinelli y Garisenda son los principales símbolos de la ciudad de Bolonia (Italia). Estas torres inclinadas, cuyas alturas son aproximadamente 97 y 48 m, fueron construidas a principios del siglo XII, y son dos de los pocos supervivientes de unos 100 edificios medievales altos que una vez caracterizaron a la ciudad. Por lo tanto, forman parte del patrimonio cultural italiano y su salvaguardia es extremadamente importante. Con el fin de evaluar en detalle las deformaciones de estas torres y en particular, las desviaciones respecto a una inclinación regular de sus paredes, se utilizan el láser escáner terrestre y un método de análisis directo y eficiente desarrollado por los autores. Las torres se escanean a partir de seis puntos de vista, proporcionando 19 nubes de puntos con una cobertura completa de las superficies visibles y con grandes áreas de solapamiento. Los

resultados muestran varias zonas afectadas por deformaciones significativas y cambios de inclinación. En el caso de la torre Asinelli, la correspondencia entre la deformación medida y la deformación esperada teórica causada por una secuencia sísmica, es clara. Este hecho denota una alta sensibilidad de la torre a las cargas dinámicas. Las cargas generadas por el hombre (por ejemplo, vibración debido al tráfico de vehículos) deben ser evitadas o por lo menos reducidas.

- *“Modelling masonry arches shape using terrestrial laser scanning data and nonparametric methods”* (Armesto et al., 2010). Los arcos de fábrica son una de las formas estructurales más comunes en los puentes históricos y la arquitectura de todo el mundo. También en las cúpulas y bóvedas, el análisis dimensional y estructural sigue siendo objeto de numerosas investigaciones. El control de la deformación en puentes históricos de arco implica una serie de dificultades derivadas de la técnica de medición y la metodología de análisis. Se utiliza el láser escáner para obtener la geometría. Este artículo presenta una metodología para estimar la deformación de arcos o bóvedas basadas en la simetría de secciones transversales obtenidas a lo largo de la directriz de la bóveda. La geometría exacta de los arcos se obtiene por medio de un levantamiento con láser escáner, y la nube de puntos se procesa por métodos no paramétricos estadísticos basados en suavizadores locales.

PARTE III: MARCO TEÓRICO

4.- Sistemas GNSS.-

4.1.- Introducción.-

Los Sistemas Globales de Posicionamiento (GNSS-Global Navigation Satellite Systems) son sistemas pasivos de navegación que están basados en satélites emisores de radiofrecuencias, que proporcionan un marco de referencia espacio-temporal con cobertura global, independiente de las condiciones atmosféricas, de forma continua en cualquier lugar de la Tierra, y disponible para cualquier número de usuarios (Sánchez et al., 2013).

Los GNSS más importantes son la Constelación NAVSTAR (NAVigation Satellite Timing And Ranking Global Positioning System), creada por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, y la Constelación GLONASS (Global Navigatsionnaya Sputnikova Sistema), creada por el Departamento de Defensa de la antigua Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas, actualmente Rusia.

Los inicios de estos sistemas fueron de aplicación militar pero actualmente estos sistemas han desarrollado múltiples actividades profesionales: dispositivos para la navegación aérea, marítima y terrestre, servicios basados en la localización (LBS), topografía y geodesia, sistemas de información geográfica y agricultura.

Las prestaciones comunes a los sistemas GNSS son (García, 2008):

- *Cobertura*: los GNSS deben tener una cobertura mundial.
- *Disponibilidad*: el sistema debe garantizar su normal funcionamiento durante un porcentaje muy elevado de tiempo, en torno al 95% o 99%.
- *Precisión*: el sistema debe proporcionar un posicionamiento espacial y temporal preciso.
- *Integridad*: la integridad es un concepto fundamental en la navegación. Hace referencia a cómo de fiables son los datos que se están usando para seguir una determinada ruta o realizar una determinada operación. Para cuantificar la integridad, se suele expresar el riesgo de pérdida de integridad como la probabilidad de un fallo no detectado.
- *Continuidad de servicio*: concepto que se refiere sobre todo al servicio prestado por el GPS, ya que el Gobierno Norteamericano podría apagar la señal civil que generan sus satélites, terminando o interrumpiendo así su servicio.

Los sistemas GPS y GLONASS no cumplen plenamente, por sí solos, los requisitos OACI (Organización de Aviación Civil Internacional) de integridad, precisión, disponibilidad y continuidad de servicio y, por lo tanto, necesitan ser complementados mediante los denominados sistemas de aumentación (ABAS, SBAS y GBAS), que les permitan obtener un posicionamiento más preciso (Román y Diez, 1999).

GBAS es un sistema de aumento local para GNSS usado y estandarizado por la OACI (Organización de Aviación Internacional Civil) para la aproximación de precisión y las operaciones de aterrizaje, con un nivel alto de integridad (ESA, 2009).

Para el vuelo en ruta los sistemas ABAS proporcionan los datos de navegación, siendo capaces de detectar fallos en el envío de la información (ESA, 2009).

SBAS, además de cumplir los estándares de OACI, hace posible la mejora en la agricultura de precisión, la dirección de maquinaria agrícola, la dirección de flotas de vehículos sobre vías terrestres, la exploración de petróleo para la colocación de plataformas en el mar o científicos como la geodesia, etc. (ESA, 2009).

Todo ello ha supuesto una evolución en los sistemas GNSS (Figura 8):

- GNSS-1: está formado por GPS, GLONASS y los sistemas de aumentación.
- GNSS-2: que estará formado por las actualizaciones de GPS y GLONASS y el nuevo sistema GALILEO que está poniendo en marcha la Unión Europea.

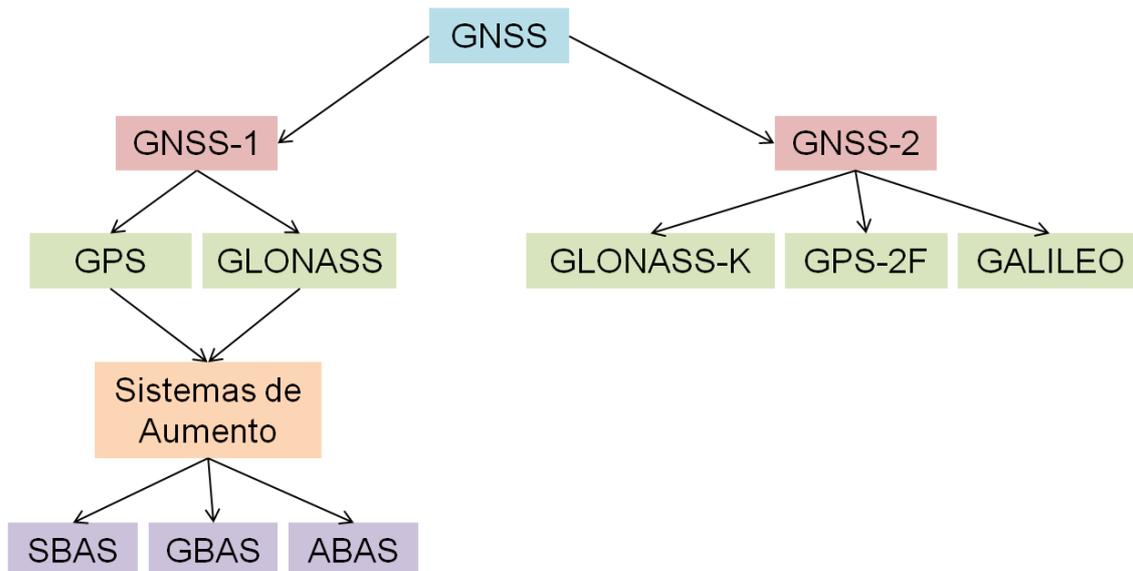


Figura 8.- Esquema de la evolución de los sistemas GNSS (elaboración propia).

4.2. - NAVSTAR GPS.-

4.2.1.- Fases de desarrollo.-

El NAVSTAR GPS es actualmente el único sistema de posicionamiento global completamente operativo. El GPS tiene su origen en el sistema TRANSIT un sistema de navegación que surgió en los años 60 como resultado de la colaboración entre los Departamentos de Defensa y Transporte de los EEUU y la NASA.

El proyecto NAVSTAR GPS nace en 1973. La iniciativa, financiación y explotación corrieron a cargo del Departamento de Defensa. El proyecto se desarrolló en distintas fases (García, 2008):

- *Fase 1 (1973-1977)*: estudio de conceptos, diseño y viabilidad del proyecto.
- *Fase 2 (1978-1988)*: producción del primer bloque de satélites que servirá para validar el sistema.
- *Fase 3 (1989-1995)*: conseguir un segmento espacial plenamente operativo con el lanzamiento del segundo bloque de satélites. Se declara la Capacidad Inicial Operativa en 1993 (IOC), y se declara la Plena Capacidad Operativa en 1995 (FOC) estando los 24 satélites que componen el segmento espacial operativos.

- *Fase 4 (1996-2001)*: lanzamiento y desarrollo del tercer bloque de satélites, y operación y mantenimiento del GPS.
- *Fase 5 (2002-2013)*: desarrollo de los nuevos satélites con mejores prestaciones que sustituirán a los antiguos, y lograr una constelación más robusta.

4.2.2.- Segmento espacial.-

El segmento espacial del GPS constaba de 24 satélites distribuidos en seis planos orbitales con una inclinación de 55° sobre la línea del horizonte y una altitud de unos 20200 Km. El período de cada satélite para completar una órbita es de doce horas, siendo la posición la misma al cabo de un día sideral.

En la actualidad hay un total de 30 satélites en el segmento espacial del GPS, que garantizan unas mejores prestaciones en cuanto a disponibilidad e integridad (Figura 9).



Figura 9.- Distribución original de la constelación de 24 satélites (Colorado, 2013).

Los satélites GPS se lanzaron en distintas fases, y a cada grupo de satélites se le conoce como bloque.

Bloque I de satélites GPS

Compuesto por los once primeros satélites que se lanzaron al espacio, adjudicados a Rockwell International. Se corresponden con los satélites del 1 al 11 lanzados entre los años 1978 y 1985. Fueron los satélites que sirvieron para validar el proyecto y estaban distribuidos a una altitud de 20.200 km (10.900 millas náuticas) con un ángulo de inclinación de 63 grados (Moreno et al., 2013).

Ninguno de ellos está ahora en servicio, si bien su tiempo de vida estimado era de 5 años, duraron más de lo previsto.

Bloque II de satélites GPS

Está compuesto por los satélites lanzados de 1989 a 2006. Los satélites diseñados entre estas fechas se conocen como BLOCK II, BLOCK IIA, BLOCK IIR y BLOCK IIR-M.

Los satélites BLOCK IIR-M son los tres últimos satélites lanzados al espacio en 2005 y 2006, y aunque se consideran del BLOCK IIR, tienen nuevas prestaciones como el código L2C en la banda de frecuencias L2 (Moreno et al., 2013).

4.2.3.- Segmento de control.-

El segmento de control del GPS está compuesto por los siguientes elementos (García, 2008) (Figura 10):

- *Estación de control maestra (MCS)*: situada en Colorado, en la base Falcon de la US Air Force. Existen además dos estaciones de reserva en California y Maryland.
- *Estaciones de control*: Isla Ascensión, Diego García y Kwajalein son estaciones de seguimiento y transmiten información a los satélites; Hawai y Colorado Springs solamente reciben información de los satélites.

Las estaciones de control reciben la información de los satélites, como puede ser su posición y trayectoria futura, mensajes, etc. Estos datos se envían a la estación de control maestra, que los procesa y aplica las correcciones necesarias.



Figura 10.- Segmento de control GPS (Colorado, 2013).

Estas correcciones se transmiten por las estaciones de seguimiento, corrigiendo el reloj y la telemetría. Estas correcciones se realizan tres veces al día. La modificación de la órbita de los satélites las realiza directamente la estación de control maestra.

En caso de fallo de la estación de control maestra, las dos estaciones de reserva (California y Maryland) funcionan automáticamente sin que se altere el normal funcionamiento del sistema.

4.2.4.- Servicios GPS.-

El GPS provee dos niveles de servicio conocidos como SPS y PPS (García, 2008):

- *SPS*: es el servicio que está disponible a nivel global para todos los usuarios de GPS de manera gratuita.
- *PPS*: es el servicio militar de alta precisión, velocidad y servicio temporal, dirigido sólo a los usuarios autorizados por los EEUU, estando dicha información encriptada.

4.3.- GLONASS: Global Navigation Satellite System.-

4.3.1.- Fases de desarrollo.-

A principios de los años 70, quizá como una respuesta al desarrollo del Sistema GPS, el antiguo Ministerio de Defensa Soviético desarrolló el sistema GLONASS.

En el año 1993, oficialmente el Gobierno Ruso colocó el programa GLONASS en manos de Fuerzas Espaciales Militares Rusas (RSF). Este organismo es el responsable del desarrollo de satélites GLONASS, de su mantenimiento y puesta en órbita, y certificación a los usuarios. Este organismo opera en colaboración con el CSIC (Coordinational Scientific Information Center), el cual publica la información sobre GLONASS (García, 2008).

Desde su inicio, el desarrollo de GLONASS corrió a cargo de Applied Mechanics NPO, contratista principal, que desarrolló e implementó todo el sistema. Applied Mechanics NPO, ha sido la compañía que ha diseñado los satélites y las instalaciones para su lanzamiento, así como los centros de control automatizados (García, 2008).

El sistema se desarrolló en 3 fases (Glonass, 2005):

- *Fase 1 (1983-1985):* se estableció el concepto del sistema y se pusieron en órbita seis satélites.
- *Fase 2 (1986-1993):* se completa la constelación con 12 satélites siendo operativo a nivel regional.
- *Fase 3 (1993-1995):* finalización a nivel teórico del sistema.

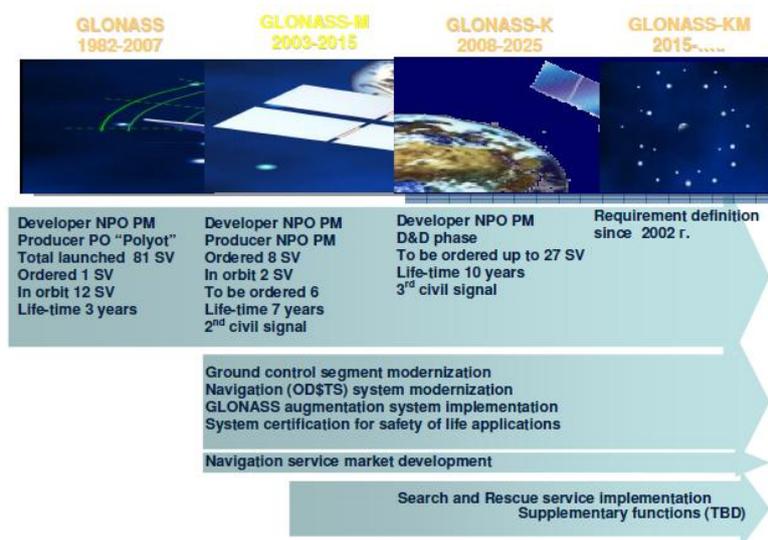


Figura 11.- Plan de renovación de GLONASS (Glonass, 2005).

Aunque el sistema se desarrolló entre 1982 y 1991, la caída de la Unión Soviética paralizó el desarrollo del sistema, que fue retomado por la Federación Rusa, que lo declaró oficialmente operativo en 1993. Sin embargo, debido a problemas económicos durante los años 1996 a 2002, Rusia fue incapaz de mantener su propio sistema de

navegación, manteniendo solamente ocho satélites operativos, lo que lo convirtió en prácticamente un sistema inútil a nivel global.

El plan de modernización como se puede apreciar en la figura 11 consta de cuatro fases (Glonass, 2005):

- *Primera fase (1982-2007)*: todavía no es capaz de prestar una Capacidad Inicial Operativa como GNSS.
- *Segunda fase (2003-2015)*: planificada a medio plazo, implica el lanzamiento de satélites más modernos y el comienzo de la modernización del segmento de control, así como la puesta en marcha de nuevos servicios a través de nuevas señales.
- *Tercera fase (2008-2025)*: pretende dotar de una Capacidad Plenamente operativa a GLONASS, consolidar el desarrollo del mercado civil y completar los sistemas de aumento, así como la puesta en marchas del servicio Safety of Life (SoL).
- *Cuarta fase (2015-...)*: todavía no definido el plan más allá de 2025. Implicará el mantenimiento del sistema existente.

4.3.2.- Segmento espacial.-

El segmento espacial de GLONASS está formado por una constelación de 24 satélites en órbita, estando 21 en activo y 3 de repuesto. Éstos están distribuidos en 3 planos orbitales separados 120° , que contienen 8 satélites a 19100 Km de altura con una inclinación de 64.8° y que tarda 11 horas y 15 minutos en completar un período (García, 2008) (Figura 12).

En la actualidad hay 16 satélites en órbita de los cuales 10 son operativos y 6 están apagados de forma temporal.

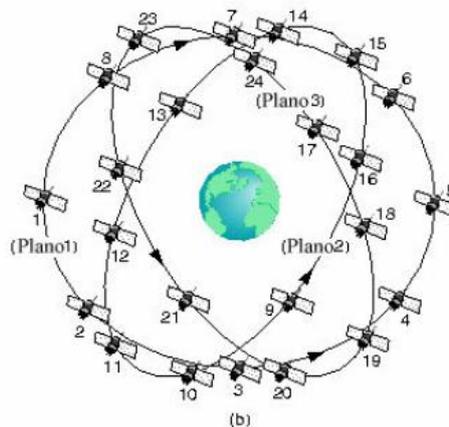


Figura 12.- Constelación GLONASS (Glonass, 2005).

Desde que se empezó a desarrollar el sistema en 1982 se han desarrollado cuatro modelos de satélites (García, 2008):

- Bloque I de satélites: La primera generación de satélites conocida como Block I se lanzó entre 1982 y 1985, diseñados con un tiempo de vida de 14 meses sirvieron como prototipos para la validación del GLONASS.
- Bloque II de satélites: Subdividido en distintos bloques, ha sido la más numerosa hasta ahora. Entre 1985 y 1986 se lanzaron seis satélites de Bloque IIa, tenían nuevos estándares de tiempo y frecuencia que mejoraban, con respecto de los prototipos, la estabilidad en frecuencia. Además tenían un tiempo de vida mayor, de unos 16 meses. El siguiente fue el Bloque IIb, lanzados en 1987, con un tiempo de vida de dos años y algunas mejoras, un total de doce fueron lanzados aunque la mitad se perdieron en accidentes de lanzamiento. El modelo actual es el Bloque IIv, lanzados desde 1988 hasta el 2000 con un tiempo de vida de tres años, han llegado a durar más de 65 meses en órbita apagándolos de manera temporal.
- Uragan M: Constituyen la segunda generación de satélites GLONASS, con un tiempo medio de vida de 7 años. Han sido lanzados entre 2001 y 2007, con un total de catorce lanzamientos.
- Uragan K: La tercera generación de satélites, con un tiempo de vida de 10 años es más ligera e incluye mejoras con respecto a su generación anterior.

4.3.3.- Segmento de control.-

El Sector de Control está formado por un Sistema Central de Control (SCC) en la región de Moscú (Golitsyno-2) y una red de estaciones de seguimiento y control (Command Tracking Stations, CTS), emplazadas por toda el área alrededor de Rusia (Holanda y Bermejo, 1998).

Las estaciones de control (CTS) realizan el seguimiento de los satélites y almacenan los datos de distancias y telemetría a partir de las señales de los satélites. La información obtenida en las CTS es procesada en el Sistema Central de Control (SCC) para determinar los estados de las órbitas y relojes de los satélites, y para actualizar el mensaje de navegación de cada satélite. Esta información es enviada a cada satélite por medio de las CTS. Las CTS calibran periódicamente los datos de distancias a los satélites mediante láser. Para ello, los satélites GLONASS van provistos de unos reflectores especiales.

La sincronización de todos estos procesos en el Sistema GLONASS es muy importante. Para conseguir esta sincronización, se dispone de un reloj atómico de hidrógeno de alta precisión (Sistema Central de Control), el cual determina la escala de tiempo GLONASS. Los satélites GLONASS llevan a bordo un reloj de cesio y se sincronizan respecto a la State Etalon UTC (CIS) en Mendeleevo, a través de la escala de tiempo del sistema GLONASS (Holanda y Bermejo, 1998).

A todas estas estaciones de control hay que añadir otras estaciones de seguimiento que se utilizan para obtener los parámetros de transformación del Sistema GLONASS PZ-90 al Sistema GPS WGS-84, además de la determinación de las órbitas y observación y análisis de las anomalías de los satélites. Estas estaciones están repartidas por todo el mundo (García, 2008).

4.3.4.- Servicios GLONASS.-

GLONASS ofrece dos tipos de servicio: una señal de precisión estándar (conocido como CSA), y una señal de alta precisión (CHA).

El Gobierno Ruso ha decidido poner a disposición civil la señal estándar, para que pueda ser utilizada una vez esté completado todo el sistema. La señal se emite también en la banda L1 de frecuencias.

4.4.- Normativa ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones).-

El hecho de que existan distintos GNSS, implica que deben poder coexistir sin interferir unos con otros, esto es así en todos los niveles (Coit, 2013):

- *Interfaz:* las señales definidas para cada GNSS no deben interferir con las de los demás.
- *Segmento espacial:* las comunicaciones del segmento espacial no debe interferir con otro tipo de comunicaciones, como los satélites de comunicaciones móviles, u otras señales de radio.
- *Segmento de control:* las señales que emita no deben interferir con otras comunicaciones y debe ser compatible con otros elementos como radares de radiolocalización.

Todos estos aspectos se regulan en las World Radiocommunication Conference (WRC) organizadas por la ITU, en concreto la ITU-R. Estas conferencias se celebran cada dos o tres años y su labor consiste en examinar y, en caso necesario, modificar el Reglamento de Radiocomunicaciones, que es el tratado internacional por el cual se rige la utilización del espectro de frecuencias radioeléctricas y de las órbitas de los satélites geoestacionarios y no geoestacionarios (García, 2008).

El espectro quedó aprobado en la WRC 2000 para los sistemas GPS, GLONASS y GALILEO de la siguiente manera (Figura 13):

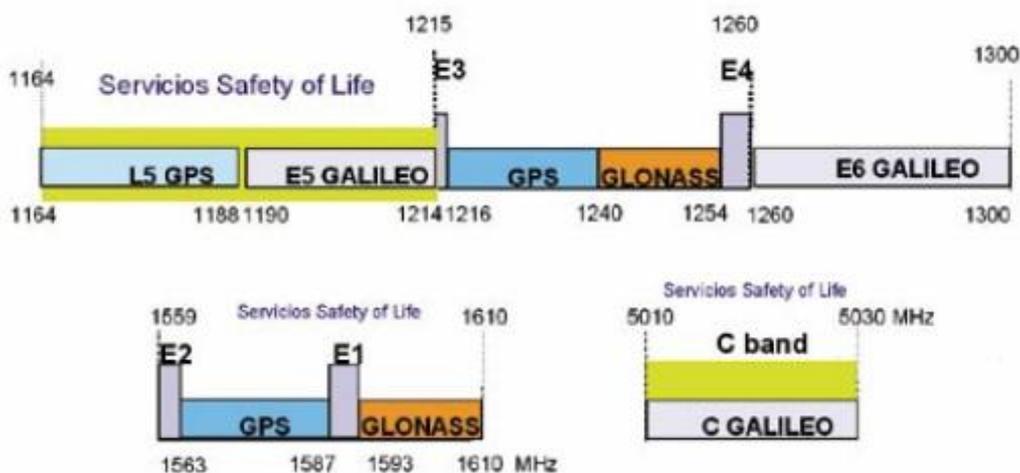


Figura 13.- Distribución de frecuencias aprobada por la ITU (Coit, 2013).

5.- Geotécnia.-

5.1.- Conceptos previos.-

Cuando un talud presenta signos de inestabilidad (grietas o roturas en la parte superior, abultamiento y levantamiento en la zona de pie, etc.) o cuando se precisa controlar el comportamiento de un talud frente a la estabilidad, se recurre a la instrumentación o auscultación del talud y su entorno, a fin de obtener información sobre el comportamiento del mismo y las características del movimiento; velocidad, pautas en los desplazamientos, situación de las superficies de rotura, presiones de agua, etc (González, 2002) (Obando, 2009).

El estudio de estabilidad de taludes se halla a través del estado último o rotura de masas de suelo. La inestabilidad se debe al peso y los efectos de filtración, a estos factores hay que añadirle las posibles cargas externas.

En nuestro caso, la Catedral transmite un peso añadido al talud, lo que como es de esperar influye en la estabilidad de la ladera próxima a ésta.

La preponderancia de las acciones gravitatorias condiciona, sobre todo, la definición de seguridad frente a rotura. En el caso de una cimentación superficial, el cálculo de la carga de hundimiento, para unas características dadas del terreno, tiene un sentido obvio. De acuerdo con él, la propuesta de un factor de seguridad como cociente entre carga de rotura y carga de servicio, parece una elección razonable (Chávez, 2011).

Se hace necesario determinar de forma cuantitativa los índices de riesgo y seguridad, esto exige el empleo de técnicas y modelos propios de la Mecánica del Suelo o de las Rocas. Los modelos de cálculo son solo una parte del problema, cuando se trata de laderas naturales, habrán de integrarse los estudios y aportaciones geológicas y geomorfológicas con técnicas de análisis, predicción y corrección, en su caso (Alonso, 2005).

Definición de talud

Se entiende por talud a cualquier superficie inclinada respecto de la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de tierra. El estudio de taludes es complejo ya que no sólo se debe analizar la mecánica del suelo sino también la geología (De Matteis et al., 2003).

Cuando el talud se produce en forma natural, sin intervención humana, se denomina ladera natural o simplemente ladera (Figura14) (De Matteis et al., 2003).

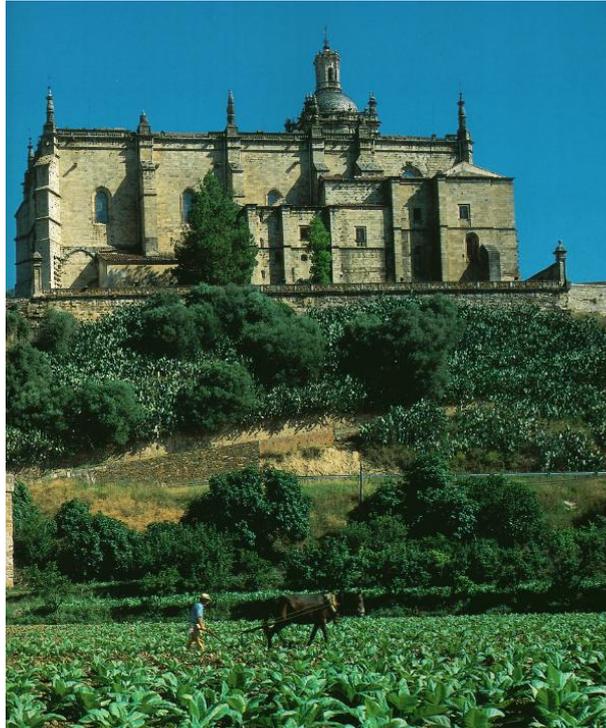


Figura 14.- Talud Catedral de Coria (García, 1999).

Los deslizamientos de taludes pueden ser catastróficos, suelen llevar anexos la pérdida de bienes e incluso a veces vidas.

Definición de estabilidad

Se entiende por estabilidad a la seguridad de una masa de tierra contra la falla o movimiento. Como primera medida es necesario definir criterios de estabilidad de taludes, entendiéndose por tales algo tan simple como el poder decir en un instante dado cual será la inclinación apropiada en un corte o en un terraplén; casi siempre la más apropiada será la que tenga más pendiente y se sostenga el tiempo necesario sin caerse. Este es el centro del problema y la razón de estudio (De Matteis et al., 2003).

Generalmente, los principales problemas de estabilidad, se deben a que los taludes son estructuras muy complejas, que presentan diversos puntos de vista dignos de estudio y a través de los cuales la naturaleza se manifiesta de diversas formas.

Existe una gran diferencia entre, la estabilidad de laderas o taludes naturales frente a los taludes artificiales o hechos por el Ingeniero. Las principales diferencias son: la naturaleza de los materiales, la formación del talud, historia geológica, condiciones climáticas a lo largo de la historia y la influencia del hombre a través del tiempo. Todos estos factores definen aspectos tan importantes como la configuración del suelo que además nos permiten conocer las condiciones de estabilidad (De Matteis et al, 2003).

5.2.- Concepto de factor de seguridad.-

El factor de seguridad es empleado por los Ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza de que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña (Tabla 1). Fellenius (1922) presentó el factor de seguridad como la relación

entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie de posible falla:

$$F.S. = \frac{\text{Resistencia al corte disponible}}{\text{Esfuerzo al cortante actuante}}$$

En superficies circulares donde existe un centro de giro y momentos resistentes y actuantes:

$$F.S. = \frac{\text{Momento resistente disponible}}{\text{Momento actuante}}$$

Existen, además, otros sistemas de plantear el factor seguridad, tales como la relación de altura crítica y altura real del talud y método probabilístico.

La mayoría de los sistemas de análisis asumen un criterio de “equilibrio límite” donde el criterio de falla de Coulomb es satisfecho a lo largo de una determinada superficie.

Se estudia un cuerpo libre en equilibrio, partiendo de las fuerzas actuantes y de las fuerzas resistentes que se requieren de cada tajada por separado. Una vez realizado el análisis de cada tajada se analizan las condiciones de equilibrio de la sumatoria de fuerzas o de momentos (Suárez, 2001).

$$F.S. = \frac{\sum \text{Resistencias disponibles al cortante}}{\sum \text{Esfuerzos al cortante}}$$

$$F.S. = \frac{\sum \text{Momentos resistentes disponibles}}{\sum \text{Momentos actuantes}}$$

Factor de Seguridad		Nivel o grado de Estabilidad
Estático	Pseudoestático	
1.0 a 1.2	Menor a 1.0	Inestable
1.2 a 2.0	1.0 a 1.2	Estable
Mayor a 2.0	Mayor a 1.2	Muy estable

Tabla 1.- Grado de estabilidad de taludes.

5.3.- Influencia del tipo de material.-

La inestabilidad que puede producirse en talud viene definida por el tipo de material. Las estructuras del material son conocidas, por tanto es posible determinar que tipo de movimiento se puede dar.

El talud sobre el que se asienta la Catedral es de tipo “suelos”.

Los suelos constituyen un agregado de partículas sólidas con diferente grado de consolidación, que pueden desarrollarse “in situ” formando una cobertera de los macizos rocosos o bien pueden haber sufrido un cierto transporte (Ayala y Andreu, 2006).

5.3.1.- Suelos.-

Las diferencias de comportamiento que presentan estos materiales frente a los rocosos, se deducen de su definición como: conjunto de partículas solidas, sueltas o poco cementadas, más o menos consolidadas, de naturaleza mineral, fragmentos de roca, materia orgánica, etc., con fluido intersticial rellenando huecos y que han podido sufrir transporte o desarrollarse “in situ”.

El comportamiento de las masas de suelo se asemeja al de un medio continuo y homogéneo. Las superficies de rotura se desarrollan en el interior, sin seguir una dirección preexistente.

Básicamente suelen diferenciarse estos materiales atendiendo a su génesis:

- *Transportados*: coluviones, aluviales, glacis, etc.
- *Desarrollados in situ*: aluviales.

Existen definiciones de tipo gradacional desde el punto de vista de la ingeniería civil, así:

- *Derrubios*: generalmente superficiales con alto contenido en material grueso.
- *Depósitos de barro*: compuesto por materiales con pocos gruesos y cuya fracción más fina puede oscilar entre arenas no plásticas y arcillas de alta plasticidad.

La dinámica de estos materiales depende de las propiedades y características de sus agregados. Habrá que considerar:

- *Tamaño, forma y grado de redondez* de las partículas más gruesas.
- *Proporción del contenido en arenas y/o arcilla*.
- *Contenido en agua del suelo* y situación de *nivel freático*, etc.

Toda serie de características confieren a los suelos una resistencia intrínseca que constituye el factor dominante de su estabilidad (Ayala y Andreu, 2006).

5.4.- Tipos de movimientos.-

La fase de reconocimiento y clasificación del tipo de movimiento es de gran importancia ya que puede condicionar el análisis y conclusiones de control y estabilidad del mismo (Ayala y Andreu, 2006).

Los tipos de movimientos más comunes son:

- Desprendimientos.
- Vuelcos por flexión, bloques y mixto.
- Deslizamientos, falla rotacional, traslacional y extensiones laterales.
- Coladas, en roca y en suelos.
- Movimientos complejos, deslizamiento rotacional y traslacional, deslizamiento traslacional y colada de barro y deslizamiento rotacional y vuelcos.

La ladera sur de la Catedral presenta un movimiento del tipo, deslizamiento falla rotacional.

5.4.1.- Deslizamientos.-

Se denomina deslizamiento a la rotura y al desplazamiento del suelo situado debajo de un talud, que origina un movimiento hacia abajo y hacia fuera de toda la masa que participa del mismo.

En el caso de la Catedral, la falla se produce entre otras cosas por una desintegración gradual de la estructura del suelo y un aumento de las presiones intersticiales debido a filtraciones de agua. Este deslizamiento sucede al superarse la resistencia al corte del material.

Generalmente las superficies de deslizamiento son visibles o pueden deducirse razonablemente.

La velocidad con que se desarrollan estos movimientos es variable, dependiendo de la clase de material involucrado en los mismos.

El movimiento puede ser progresivo, produciéndose inicialmente una rotura local, que puede no coincidir con la superficie de rotura general, causada por una propagación de la primera (De Matteis et al, 2003).

Deslizamiento rotacional:

En primer lugar se define una superficie de falla curva, a lo largo de la cual ocurre el movimiento del talud. Esta superficie forma una traza con el plano del papel que puede asimilarse, por facilidad y sin mayor error a una circunferencia, aunque pueden existir formas algo diferentes, en la que por lo general influye la secuencia geológica local, el perfil estratigráfico y la naturaleza de los materiales. Estas fallas son llamadas de rotación (De Matteis et al, 2003).

Este tipo de fallas ocurren por lo común en materiales arcillosos homogéneos. En general afectan a zonas relativamente profundas del talud, siendo esta profundidad mayor cuanto mayor sea la pendiente.

El movimiento tiene una naturaleza más o menos *rotacional*, alrededor de un eje dispuesto paralelamente al talud (Figura 15).

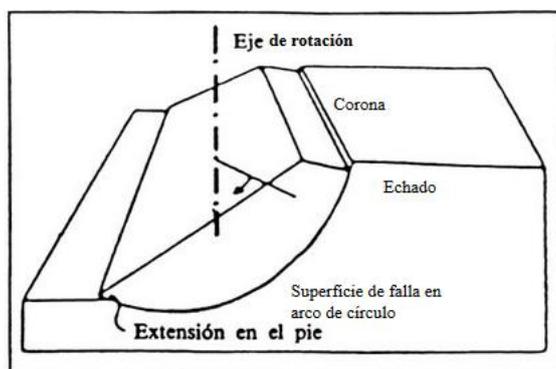


Figura 15.- Rotura típica con forma cilíndrica (Varnes, 1978).

La salida de las superficies circulares sobre las que se produce la rotura puede originarse en tres partes diferentes del talud, según las características resistentes del material, altura e inclinación del talud, etc. (Figuras 16 y 17).

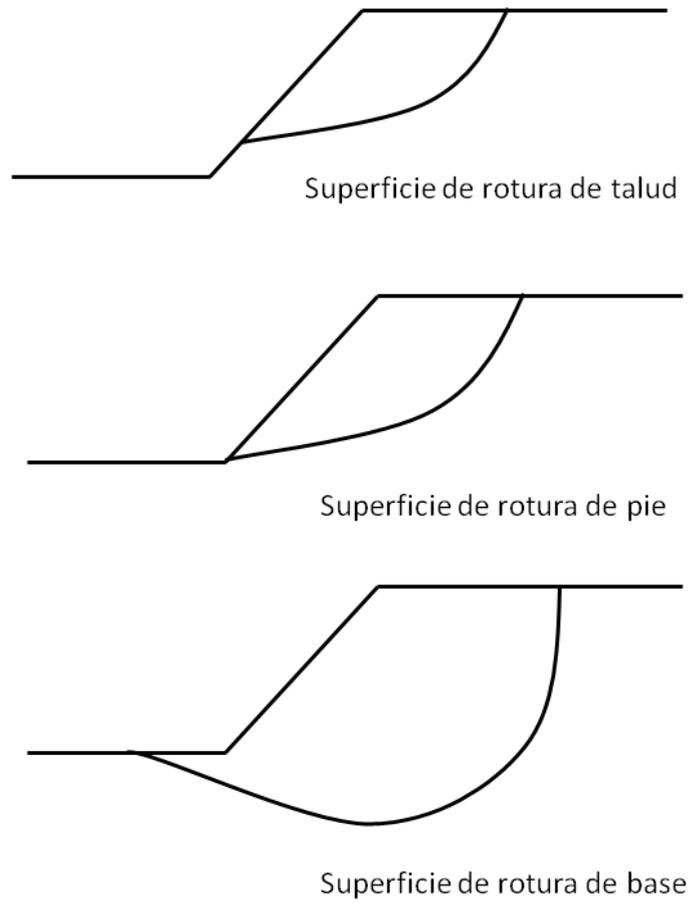


Figura 16.- Diferentes superficies circulares de rotura (elaboración propia).

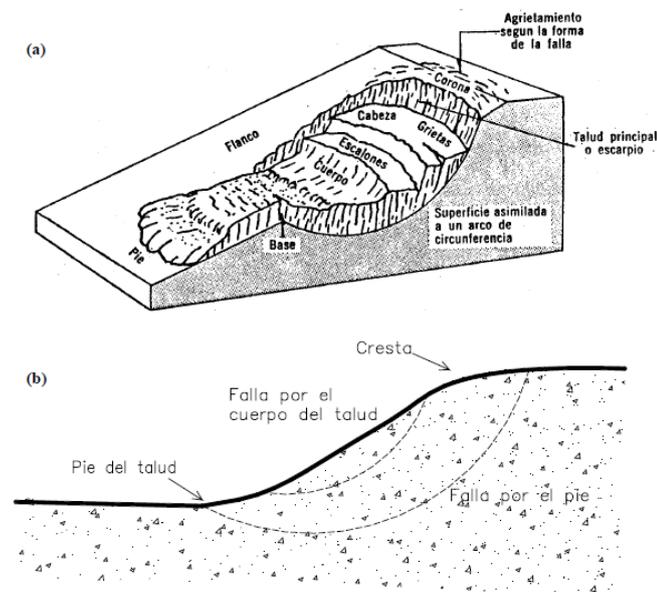


Figura 17.- (a) Nomenclatura de una zona de falla. (b) Tipos de falla (Varnes, 1978).

Si la superficie de rotura corta al talud por encima de su pie, se denomina *superficie de rotura de talud*.

Cuando la salida se produce por el pie del talud y queda por encima de la base de dicho talud, recibe el nombre de *superficie de rotura de pie de talud*.

Si la superficie de rotura pasa bajo el pie del talud de salida en la base del mismo y alejada del pie, se denomina *superficie de rotura de base de talud* (De Matteis et al., 2003).

5.5.- Morfología y partes de un deslizamiento rotacional.-

En un deslizamiento se suelen distinguir varias partes. La figura 18 (Varnes, 1978) muestra un típico deslizamiento rotacional, con las diferentes partes y su nomenclatura usual. Los términos empleados son (Ayala y Andreu, 2006):

- *Escarpe principal*: superficie que se forma sobre el terreno no deslizado en la periferia del deslizamiento. Se desarrolla a causa del movimiento del material deslizado hacia abajo y adentro respecto del material intacto.
- *Escarpe secundario*: superficie escarpada que se forma dentro del material desplazado debido a movimientos del mismo.
- *Cabeza*: parte superior del material deslizado.
- *Coronación*: lugar geométrico de los puntos más altos del contacto entre el material desplazado y el escarpe principal.
- *Pie de la superficie de rotura*: intersección de la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.
- *Borde del material desplazado*: limite del material desplazado más alejado del escarpe principal.
- *Punta*: extremo del borde más distante de la coronación.
- *Pie*: porción de material desplazado, que se apoya sobre el terreno original a partir del pie de la superficie de rotura.
- *Cuerpo principal*: porción del material desplazado apoyado sobre la superficie de rotura entre su pie y el escarpe principal.
- *Flancos*: laterales del deslizamiento (derecho e izquierdo).
- *Cabecera*: material prácticamente “in situ”, adyacente a la parte superior del escarpe principal.
- *Superficie original del terreno*: talud existente antes de ocurrir el movimiento. Puede considerarse como tal la superficie de un antiguo deslizamiento estabilizado.
- *Superficie de rotura*: superficie a través de la cual tiene lugar el movimiento.
- *Superficie de separación*: superficie que limita el material desplazado del terreno original.
- *Material desplazado*: masa de material movida hacia fuera del talud, desde su posición original en el mismo. Puede encontrarse en un estado deformado.
- *Zona de deflación*: área dentro de la cual, el material desplazado se encuentra por debajo de la superficie original del terreno.
- *Zona de acumulación*: área en la que el material desplazado se dispone por encima de la superficie original del terreno.

- P : máxima profundidad del deslizamiento medida perpendicularmente al plano del talud.
- L : máxima longitud del deslizamiento medida en el plano del talud.
- HD : altura del deslizamiento medida entre la cabecera y el pie, en una misma sección.
- LD : distancia horizontal desde el pie a la cabecera, medida en una sección longitudinal de deslizamiento.

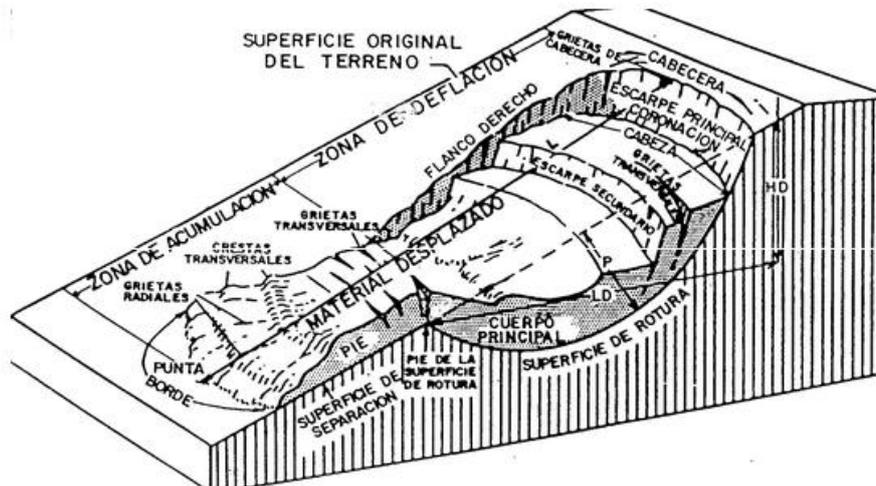


Figura 18.- Esquema de un deslizamiento rotacional (Varnes, 1978).

5.6.- Modos de fallo más usuales de los taludes asociados a estados límite.-

5.6.1.- Pérdida de la estabilidad global.-

La estabilidad global de una determinada obra se pierde cuando la tensión de corte necesaria para mantenerla es superior a la resistencia al corte del terreno, y eso ocurre, además, en una superficie de rotura, que divide a la obra en dos partes: la parte englobada entre la superficie externa y la superficie de rotura que deslizaría sobre el resto.

El deslizamiento se puede dar de dos formas, o con un movimiento brusco o lento, esto dependerá de las características del terreno (Muelas, 2010).

5.6.2.- Deformaciones.-

Las deformaciones que se producen en las zonas de desnivel o en taludes pueden ser críticas, esto puede dar lugar al estado límite último de las estructuras situadas en su proximidad.

5.6.3.- Erosiones.-

El movimiento del agua puede provocar la ruina de los taludes y de las estructuras que dependen de ellos, bien mediante erosión externa degradando su geometría, bien mediante erosión interna arrastrando materiales y provocando asentamientos o hundimientos locales.

Ambos procesos pueden ser considerados como causantes de un estado límite último de colapso progresivo, ya que pueden provocar la pérdida de equilibrio del propio talud o de estructuras próximas.

5.6.4.- Sismicidad.-

Constituyen factores de grandes inestabilidades, pudiendo ocasionar daños graves.

Cuando ocurre un sismo se generan una serie de vibraciones que se propagan como ondas de diferentes frecuencias. La aceleración, vertical y horizontal asociada a esas ondas, origina una fluctuación del estado de esfuerzos en el interior del terreno afectando al equilibrio de los taludes, así se puede producir una perturbación de trabazón intergranular de los materiales, disminuyendo su cohesión y provocando un estado límite último (Ayala y Andreu, 2006).

5.7.- Métodos de análisis de estabilidad de taludes.-

5.7.1.- Reseña histórica.-

Los primeros estudios sobre taludes datan del siglo XVIII y fueron realizados por Coulomb, que desarrolla un método para el estudio de la estabilidad de los muros que se podía aplicar también en taludes. En el siglo XIX, debido al avance del ferrocarril, se realizan grandes movimientos de tierras para la instalación de las vías, las cuales, en algunas situaciones provocan importantes deslizamientos. Por motivos de seguridad, y también económicos, se hacía necesario un método para calcular estos deslizamientos y poder prevenirlos.

Es a principios del siglo XX cuando Fellenius utiliza por primera vez el método de las dovelas (1916). En 1926, Terzaghi introduce en esta metodología el Principio de las Presiones Efectivas, pero será en 1954 cuando se introduzcan los métodos modernos con el Método Bishop que considera superficies de falla circulares y en 1956, con el Método de Jambu, para superficies de falla no circulares. Sin embargo, la complejidad de los cálculos hizo que hasta que no aparecieron las calculadoras y los ordenadores fuera prácticamente imposible llevar a la práctica estos métodos.

En la actualidad, además de los métodos de Bishop y Jambu, se utilizan los métodos de Spencer, Morgenstern y Price, y Sarma, que probablemente son los más experimentados (Cuenca, 2001).

5.7.2.- Principales métodos de análisis.-

A continuación, se muestran los métodos de análisis que se han empleado en el programa Geo-Studio para el cálculo del factor de seguridad.

a) Morgenstern & Price.

Morgenstern & Price (1965) propusieron un método que es considerado preciso aplicable a cualquier tipo de superficie de rotura. El método se basa en la suposición de que la relación entre las fuerzas tangenciales y normales en las caras laterales de las fallas, se ajusta a una función que es preciso definir previamente multiplicando por un parámetro que es la incógnita que completa la solución del problema.

Morgenstern-Price es un método riguroso en el sentido de que satisface las tres ecuaciones de equilibrio - las ecuaciones de fuerza de equilibrio en direcciones verticales y horizontales y la ecuación del momento de equilibrio. El factor de seguridad FS se encuentra a través de la iteración de las inclinaciones de fuerzas entre bloques.

Los bloques son creados dividiendo el suelo sobre la superficie terrestre dividiendo planos. Las fuerzas actuando en bloques individuales se muestran en la figura 19.

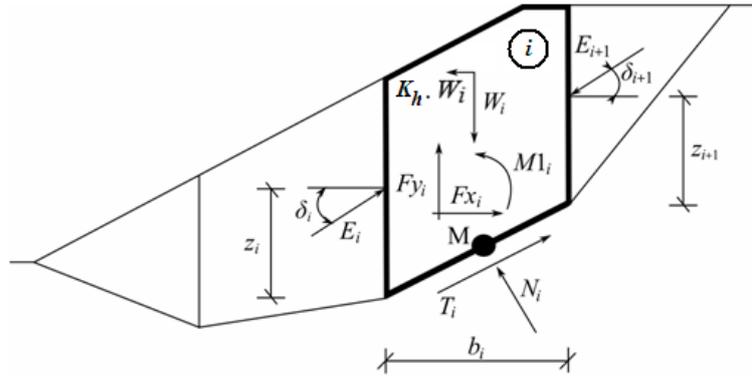


Figura 19.- Esquema estático del método Morgenstern-Price.

Cada bloque se asume para contribuir a la misma fuerza como en el método *Spencer*. Los siguientes supuestos se introducen en el método Morgenstern-Price para calcular el equilibrio límite de las fuerzas y momento de los bloques individuales:

- Los planos divididos entre bloques son siempre verticales.
- La línea de acción de peso del bloque W_i pasa por el centro del segmento i^{th} de la superficie de deslizamiento representada por el punto M .
- La fuerza normal N_i actúa en el centro del segmento i^{th} de la superficie de deslizamiento, en el punto M .
- La inclinación de las fuerzas E_i que actúan entre los bloques es diferente en cada bloque (δ_i) al punto extremo de la superficie de deslizamiento $\delta = 0$

La solución adopta la expresión (1) – (5), mostrando el método *Spencer*, es decir:

$$(1) N_i = N'_i + U_i$$

$$(2) T_i = (N_i - U_i) \tan \varphi + \frac{b_i}{\cos \alpha_i} = N'_i \cdot \tan \varphi_i + c_i \cdot \frac{b_i}{\cos \alpha_i}$$

$$(3) N'_i + U_i - W_i \cdot \cos \alpha_i + K_h W_i \cdot \text{sen} \alpha_i + Fy_i \cdot \cos \alpha_i - Fx_i \cdot \text{sen} \alpha_i + E_{i+1} \cdot \text{sen}(\alpha_i - \delta_{i+1}) - E_i \cdot \text{sen}(\alpha_i - \delta_i) = 0$$

$$(4) N'_i \cdot \frac{\tan \varphi_i}{FS} + \frac{c_i}{FS} \cdot \frac{b_i}{\cos \alpha_i} - W_i \cdot \text{sen} \alpha_i - K_h W_i \cdot \cos \alpha_i + Fy_i \cdot \text{sen} \alpha_i + Fx_i \cos \alpha_i - E_{i+1} \cdot \cos(\alpha_i - \delta_{i+1}) + E_i \cdot \cos(\alpha_i - \delta_i) = 0$$

$$(5) E_{i+1} \cdot \cos \delta_{i+1} \left(Z_{i+1} - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) - E_{i+1} \cdot \sin \delta_{i+1} \frac{b_i}{2} - E_i \cdot \cos \delta_i \left(Z_i - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) - E_i \cdot \sin \delta_i \cdot \frac{b_i}{2} + M1_i - K_h W_i (y_M - y_{gi}) = 0$$

- 1) Relación entre el valor de la tensión efectiva y tensión total de la fuerza normal actuando en la superficie de deslizamiento.
- (2) Condición de Mohr-Coulomb representa la relación entre la fuerza normal y la fuerza de corte en un segmento dado de la superficie de deslizamiento (N_i a T_i).
- (3) Fuerza de la ecuación de equilibrio en la dirección normal del segmento i^{th} de la superficie de deslizamiento.
- (4) Fuerza de la ecuación de equilibrio a lo largo del segmento i^{th} de la superficie de deslizamiento.
- (5) Momento de la ecuación de equilibrio sobre el punto M .

Modificando las fuerzas de las ecuaciones (3) y (4) se obtiene la siguiente formula recursiva:

$$(6) E_{i+1} = \frac{[(W_i - Fy_i) \cdot \cos \alpha_i - (K_h W_i - Fx_i) \sin \alpha_i - U_i + E_i \sin(\alpha_i - \delta_i)] \cdot \frac{\tan \varphi_i}{FS} + \cos(\alpha_i - \delta_{i+1})}{\sin(\alpha_i - \delta_{i+1}) \cdot \frac{\tan \varphi_i}{FS} + \cos(\alpha_i - \delta_{i+1})}$$

$$\frac{\frac{\tan \varphi_i}{FS} + \frac{c_i}{FS} \cdot \frac{b_i}{\cos \alpha_i} - (W_i - Fy_i) \cdot \sin \alpha_i - (K_h W_i - Fx_i) \cdot \cos \alpha_i + E_i \cdot \cos(\alpha_i - \delta_i)}{\sin(\alpha_i - \delta_{i+1}) \cdot \frac{\tan \varphi_i}{FS} + \cos(\alpha_i - \delta_{i+1})}$$

Esta fórmula permite calcular todas las fuerzas E_i actuando entre los bloques para un valor dado de δ_i y FS . Esta solución asume que en el origen de la superficie de deslizamiento el valor E es conocido e igual a $E_1 = 0$.

Adicionalmente la fórmula recursiva (7) sigue la ecuación de momento de equilibrio (5) como:

$$(7) Z_{i+1} = \frac{\frac{b_i}{2} \cdot [E_{i-1} (\sin \delta_{i-1} - \cos \delta_{i-1} \cdot \tan \alpha_i) + E_i (\sin \delta_i - \cos \delta_i \cdot \tan \alpha_i)] + E_i \cdot z_i \cdot \cos \delta_i - M1_i + K_h W_i (y_M - y_{gi})}{E_{i-1} \cdot \cos \delta_{i-1} + E_i \cdot \cos \delta_i}$$

Ésta fórmula permite calcular todos los brazos z_i de las fuerzas actuando entre los bloques para un valor dado de δ_i , conociendo el valor del lado izquierdo en el origen de la superficie de deslizamiento, donde $z_1=0$.

El factor de seguridad FS es determinado empleando el siguiente proceso de interacción:

- 1.- Los valores iniciales de los ángulos δ_i se determinan según la función Half-sine ($\delta_i = \lambda * f(x_i)$).

- 2.- El factor de seguridad FS para los valores dados de δ_i deduce de la ecuación (6), asumiendo el valor de $E_{n+1} = 0$ en el extremo de la superficie de deslizamiento.
- 3.- El valor de δ_i está dado por la ecuación (7) utilizando los valores de E_i determinados en el paso previo con el requisito de tener el momento en el último bloque igual a cero. Los valores funcionales de $f(x_i)$ son los mismos todo el tiempo durante la iteración, solo se itera el parámetro de λ . La ecuación (7) no provee el valor de z_{n+1} ya que éste es igual a cero. Éste valor se satisface con la ecuación de momento de equilibrio (5).
- 4.- El paso 2 y 3 se repiten hasta que el valor de δ_i (parámetro λ) no cambia.

Es necesario evadir las soluciones inestables para que el proceso de iteración sea exitoso. Estas inestabilidades ocurren cuando toma lugar la división por cero en la expresión (6) y (7). En la ecuación (7) dividir por cero se encuentra por:

$$\delta_i = \pi/2 \text{ o } -\pi/2$$

Por lo que, el valor del ángulo δ_i debe ser encontrado dentro del intervalo $(-\pi/2; \pi/2)$. La división por cero en la expresión (6) aparece cuando:

$$FS = \tan\varphi_i \cdot \tan(\delta_{i+1} - \alpha_i)$$

Otra comprobación para prevenir inestabilidad numérica es la verificación de parámetros m_α . Se satisface siguiendo la siguiente condición:

$$m_\alpha = \cos\alpha_i + \frac{\text{sen}\alpha_i \cdot \tan\varphi_i}{FS} > 0.2$$

Por lo tanto, antes de ejecutar la iteración es necesario encontrar el valor crítico más alto de FS_{min} que satisfaga las condiciones antes mencionadas. Los valores por debajo de éste valor crítico FS_{min} se encuentran en un área de solución inestable, por lo que la iteración comienza configurando FS a un valor por encima de FS_{min} y todos los valores resultantes de FS de las iteraciones ejecutadas son mayores a FS_{min} .

Generalmente los métodos rigurosos convergen mejor que los métodos simples (Bishop, Fellenius), (Morgenstern y Price, 1965) (Morgenstern y Price, 1967) (Fine, 2013).

b) Bishop.

El método de Bishop Simplificado es muy utilizado en la práctica de la ingeniería porque proporciona valores del factor de seguridad por el método de equilibrio límite muy cercanos a aquellos que proporcionan los métodos más rigurosos que satisfacen completamente las condiciones de equilibrio de fuerzas y momentos. El método de Bishop considera un problema de deformación plana en donde la superficie de falla es circular, dividiendo la masa del suelo comprendida en la superficie de falla en una cantidad limitada de dovelas verticales en las que los valores de cohesión, fricción y presión de poros permanecen constantes. En este método el factor de seguridad está definido como:

$$FS = \frac{\sum[(c' + W_i - u_i \cdot b)\tan\Phi']}{\sum W_i \text{sen}\alpha} \cdot \frac{1}{m_\alpha}$$

Donde:

FS = factor de seguridad.

c' = cohesión del suelo.

ϕ' = ángulo de fricción interna.

b = ancho de la dovela.

W_i = peso total de la dovela.

U_i = presión de poros.

α_i = ángulo de la base de la dovela con la horizontal.

Esta ecuación no lineal se resuelve por iteraciones hasta alcanzar la convergencia en el cálculo del factor de seguridad estático.

El método de Bishop tiene como base las siguientes hipótesis:

- El mecanismo de falla es circular.
- La fuerza de corte entre dovelas es nula.
- La fuerza normal actúa en el punto medio de la base de la dovela.
- Para cada dovela se satisface el equilibrio de fuerzas verticales, pero no así el equilibrio de fuerzas horizontales, ni el equilibrio de momentos.
- Para la masa total deslizante se satisface el equilibrio de fuerzas verticales y de momentos, más no el equilibrio de fuerzas horizontales.

$$\sum FV_i = 0$$

$$(1) W_i + (N_i + u_i L_i) \cos \alpha_i + T_i \sin \alpha_i = 0$$

Donde:

$$(2) T_i = \frac{1}{FS} (c' L_i + N_i \operatorname{tg} \phi')$$

$$(3) L_i = b_i \sec \alpha_i$$

Reemplazando la ecuación (3) en (2) se obtiene:

$$(4) T_i = \frac{1}{FS} (c' b_i \sec \alpha_i + N_i \operatorname{tg} \phi')$$

Luego sustituyendo la ecuación (4) en (1) y despejando N_i , se tiene:

$$(5) N_i = \frac{W_i - u_i b_i - \frac{c' b_i \operatorname{tg} \alpha_i}{FS}}{\cos \alpha_i + \frac{\operatorname{tg} \phi' \sin \alpha_i}{FS}}$$

Las fuerzas normales entre dovelas E_i , no producen momentos con respecto al centro del arco por ser fuerzas internas. Se traslada la fuerza KW_i a la base de la dovela y se aplica el par de transporte de sentido contrario.

$$R \sum W_{1i} \text{sen} \alpha_i + KR \sum W_{2i} \cos \alpha_i - \sum KW_{2i} \frac{h_i}{2} =$$

$$R \frac{1}{FS} \sum (c'_i b_i \sec \alpha_i + N_i \text{tg } \phi')$$

$$(6) \sum M (\text{centro del arco circular}) = 0$$

Despejando FS se tiene:

$$(7) FS = \frac{\sum (c'_i b_i \sec \alpha_i + N_i \text{tg } \phi')}{\left(\sum W_{1i} \text{sen} \alpha_i + K \sum W_{2i} \cos \alpha_i - \frac{K}{2R} \sum W_{2i} h_i \right)}$$

Sustituyendo la ecuación (5) en (7):

$$(8) FS = \frac{\sum (c'_i b_i + (W_{2i} - u_i b_i) \text{tg } \phi')}{\left(\sum W_{1i} \text{sen} \alpha_i + K \sum W_{2i} \cos \alpha_i - \frac{K}{2R} \sum W_{2i} h_i \right)} \cdot \frac{\sec \alpha_i}{\left(1 + \frac{\text{tg } \phi' \text{tg } \alpha_i}{FS} \right)}$$

FS = factor de seguridad.

W1i = peso de la dovela, usando el peso unitario sumergido.

W2i = peso de la dovela, usando el peso unitario in situ.

ϕ' , c' = parámetros de resistencia al corte.

b_i = ancho de la dovela.

u_i = presión de poros.

α_i = ángulo de la dovela con la horizontal.

h_i = altura de la dovela.

R = radio del círculo de falla.

K = coeficiente sísmico.

La ecuación (8) se resuelve por iteraciones hasta alcanzar la convergencia en el cálculo del factor de seguridad (Bishop y Morgenstern, 1965) (Bishop, 1955) (Ministerio, 2013).

c) Janbu.

Diseñado para superficies no necesariamente circulares, también supone que la interacción entre rebanadas es nula, pero a diferencia de Bishop, este método busca el equilibrio de fuerzas y no de momentos. Experiencias posteriores hicieron ver que la interacción nula en el caso de equilibrio de fuerzas era demasiado restrictiva, lo que obligó a introducir un factor de corrección f_0 empírico aplicable al FS (Janbu, 1973) (Ale, 2011).

$$FS = \frac{f_0 \sum \frac{(c \cdot B + (W - u \cdot B) \tan \Phi)}{\cos \alpha \cdot ma}}{\sum W \cdot \tan \alpha}$$

Donde:

$$ma = \cos \alpha \left(1 + \frac{\tan \alpha \cdot \tan \Phi}{FS} \right)$$

W: peso de la dovela.

u: presión de poros.

B: base de la dovela.

c: cohesión del suelo.

φ : ángulo de fricción del suelo.

α : ángulo de la superficie de falla en la dovela.

f_0 : factor de corrección.

FS: factor de seguridad.

6.- Láser escáner.-

6.1.- Introducción.-

En la actualidad, es común encontrarse con diversos problemas en los que sea necesario crear modelos tridimensionales de la realidad. La escena de un crimen, un accidente de tráfico, un modelado para detectar problemas estructurales en edificios, documentación del patrimonio, etc. Poder conocer en postproceso la geometría de éstos casos es de vital importancia, como también lo es poder adquirir la información de una forma rápida y con precisión milimétrica.

Los métodos topográficos tradicionales como estación total y GPS, aportan la precisión necesaria pero sin embargo no permiten hacer barridos, ya que la información que capturan es “punto a punto”. Sin embargo, la fotogrametría sí que permite sacar nubes de puntos densas, el inconveniente es el postproceso que se debe seguir una vez tomadas las fotografías.

A finales de los años 90 se empezaron a desarrollar los láseres escáneres, estos instrumentos permiten hacer barridos de millones de puntos en un espacio de tiempo reducido y con precisión milimétrica, además, se caracterizan por ser una técnica no invasiva. El postproceso de los datos es sencillo, pudiendo registrar los distintos estacionamientos en una nube final mediante la utilización de dianas (De Luis, 2009).

Estas características fueron decisivas a la hora de decidir que instrumental y metodología se empleaban en la Catedral de Coria.

6.2.- Principios del láser escáner.-

6.2.1.- El espectro electromagnético.-

El espectro electromagnético recoge desde las ondas de radio del tamaño de un edificio, pasando por las microondas, infrarrojo, el visible, ultravioleta, rayos X hasta llegar a los rayos gamma del tamaño de un núcleo atómico (Figura 20).

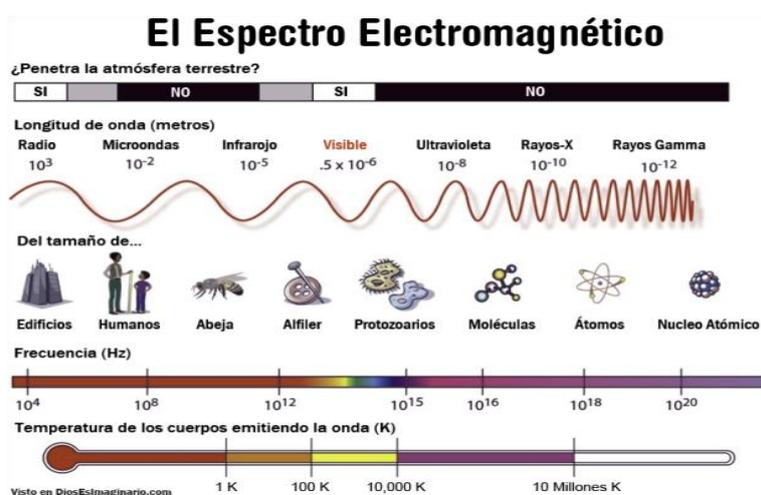


Figura 20.- El espectro electromagnético (www.astrofisicayfisica.com).

Se denomina espectro a la radiación electromagnética que emite o absorbe una sustancia.

Las formas en las que se puede expresar el espectro electromagnético son: frecuencia, términos de energía y longitud de onda.

$$c = v \cdot \lambda$$

$$E = h \cdot v = \frac{c}{\lambda}$$

Donde:

- c es la velocidad de la luz, 299.792.458 m/s.
- h es la constante de Planck, 6.626069×10^{-34} Js.
- v representa la frecuencia y λ la longitud de onda.

Las frecuencias altas del espectro electromagnético se corresponden con longitudes de onda cortas y energía alta, y las frecuencias bajas con ondas largas y baja energía.

La parte visible del espectro electromagnético es la luz, está compuesta por colores y cada color representa una longitud de onda diferente (Figura 21).

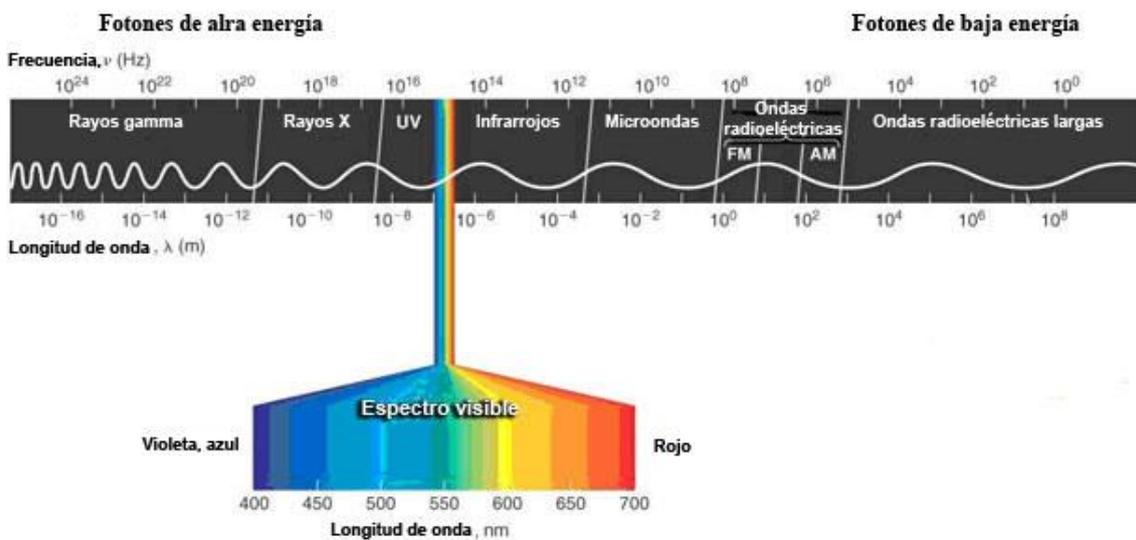


Figura 21.- Espectro visible (Light Sensitivity, 2008).

6.2.2.- Propiedades de la luz láser.-

Se llama láser al instrumento que es capaz de generar ondas de luz usando una estrecha banda del espectro electromagnético. La palabra láser es el acrónimo en inglés de las palabras amplificación de la luz por emisión inducida de radiación (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). El primer láser operativo fue mostrado en mayo de 1960 por Theodore Maiman en los laboratorios Hughes Research Laboratories (Lerma y Biosca, 2008).

La luz láser es simplemente luz generada mediante un instrumento láser. Esta luz tiene algunas propiedades muy especiales que la distinguen de la luz proveniente de otras fuentes (Paschotta, 2013):

- La luz láser se genera en forma de haz láser. Este haz láser se propaga en una dirección bien definida y moderadamente divergente.
- La luz láser puede ser visible, pero la mayoría de láseres emiten en otras regiones del espectro, particularmente en el infrarrojo cercano, que el ojo humano no puede percibir. Cuando es visible es de color rojo, verde o azul.
- La luz láser no siempre es continua, pero puede ser emitida en forma de pulsos cortos o ultra cortos.

6.2.3.- Mediciones utilizando la luz.-

La luz se ha empleado de diversas formas para medir objetos, se dividen en dos categorías (Figura 22): técnicas pasivas y activas (Blais, 2006).

La característica principal de las técnicas pasivas es que no emiten radiación, su funcionamiento se basa en detectar la radiación ambiental. Se caracterizan por ser técnicas de bajo coste, ya que con una cámara digital y un software se pueden obtener resultados.

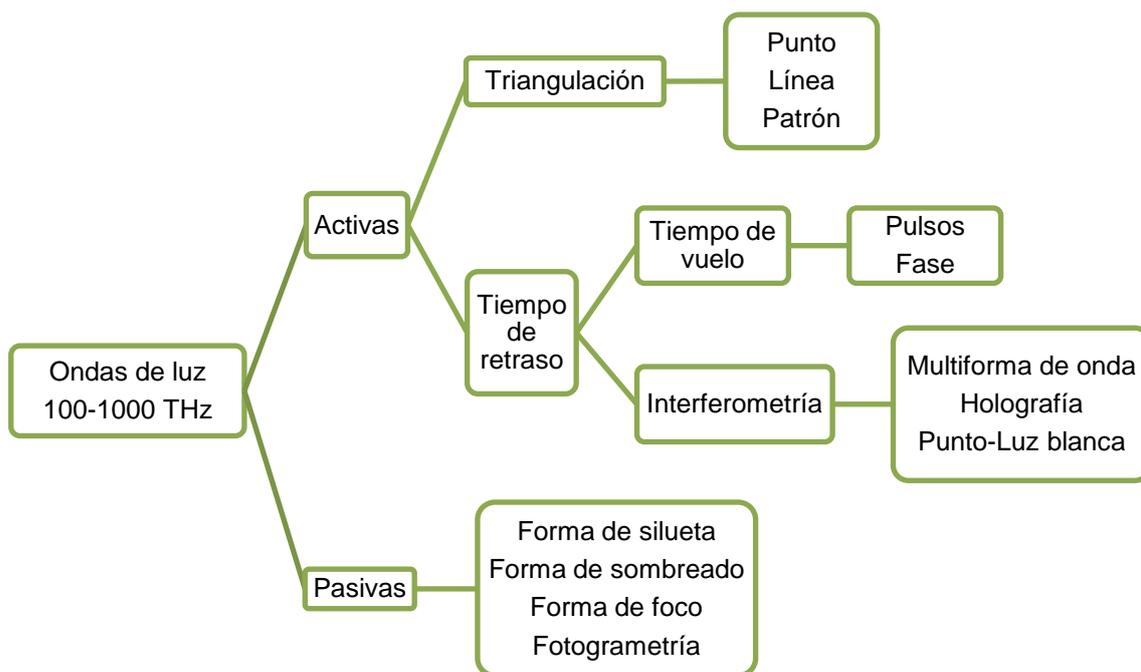


Figura 22.- Métodos de medida que utilizan la luz (Blais, 2006).

La característica principal de las técnicas activas es que emiten radiación controlada. Son muy útiles ya que no necesitan de luz ambiental para escanear, son rápidos y precisos.

Medición basada en tiempo

Se basan en técnicas de medición activas. Los escáneres de medida de tiempo son los que calculan la distancia midiendo el tiempo que transcurre entre la emisión del pulso láser y la recepción, después de que éste sea reflejado por el objeto. Dentro de éstos tenemos dos subgrupos: aquéllos que se basan en pulsos (conocidos también como tiempo de vuelo), y aquéllos que se basan en la comparación de fase (García-Gómez et al., 2011).

A) Escáneres basados en pulsos (Tiempo de vuelo):

Las mediciones basadas en pulsos, se caracterizan por medir el tiempo de vuelo de un impulso láser del dispositivo de medición a algún objeto y su regreso (Figura 23). Estos dispositivos llevan incorporado un detector de alcance láser. La función del detector es averiguar la distancia a una superficie cronometrando el tiempo de regreso de una pulsación de luz (Figura 24). El láser emite una pulsación de luz, el objetivo es calcular el tiempo en que este ha tardado en reflejar. La velocidad de la luz en el aire (c) es conocida, el tiempo (t) que tarda en regresar esta luz que también es conocida determina la distancia recorrida, que será el doble de la distancia escáner - superficie.

Por tanto:

$$D = \frac{ct}{2}$$

La precisión de un láser escáner de tiempo de vuelo está determinada por la velocidad con la que se puede medir el tiempo. El tiempo que tarda la luz en desplazarse 1 milímetro son 3,3 picosegundos. (Faro, 2010).



Figura 23.- Medición láser por pulsos (Elaboración propia).

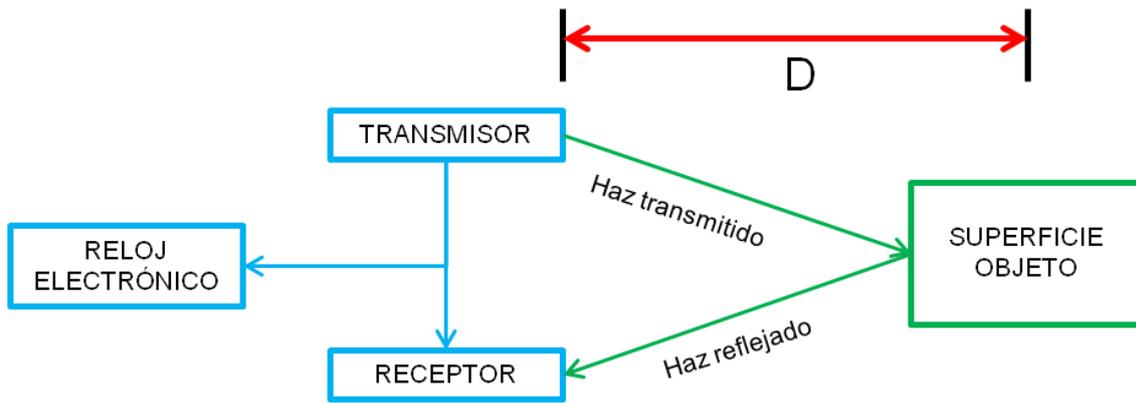


Figura 24.- Principio basado en el tiempo de vuelo (elaboración propia)

B) Escáneres basados en la fase:

Las mediciones basadas en la diferencia de fase evitan el uso de relojes de alta precisión para modular la potencia del haz láser (Lerma y Biosca, 2008). El haz láser se emite y vuelve reflejado al sistema. La distancia se mide con precisión milimétrica al analizar el desplazamiento de la longitud de onda del rayo devuelto.

El rayo láser de una onda sinusoidal conocida sale de una fuente láser ("luz emitida"). Parte de este rayo láser vuelve reflejado del objetivo a la fuente ("luz devuelta"). La fase de esta "luz devuelta" se compara entonces con la luz emitida conocida ("historial de la luz emitida"). La diferencia entre los dos picos es el "desplazamiento de fase" (Figura 25). El desplazamiento de fase ($\Delta\phi$) obtenido es 2π por tiempo de vuelo (t) por frecuencia de modulación ($f_{modulada}$) (Faro, 2010).

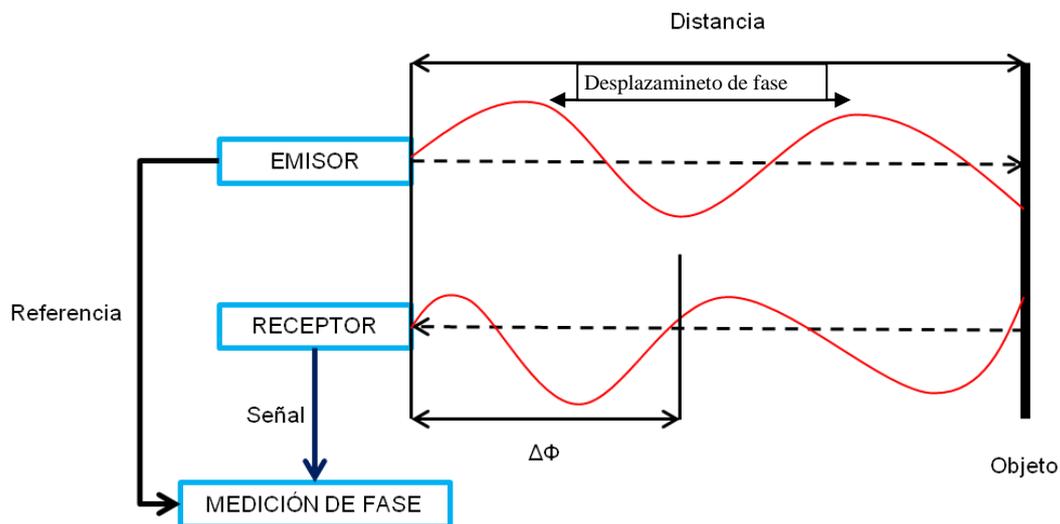


Figura 25.- Principio de medición basado en la fase (elaboración propia).

Por tanto:

$$t = \frac{\Delta\phi}{2\pi \cdot f_{modulada}}$$

Según la ecuación de medición de distancia basada en el tiempo de vuelo, la distancia al objeto viene dada por:

$$D = \frac{ct}{2} = \frac{c}{4\pi} \cdot \frac{\Delta\phi}{f_{modulada}}$$

Generalmente, la precisión de un escáner basado en fase está limitada por (Lerma y Biosca, 2008):

- Frecuencia de la señal o modulación.
- Precisión en el ciclo de medición de la fase, que depende fundamentalmente de la fuerza de la señal y del ruido.
- Estabilidad del oscilador de modulación.
- Turbulencias en el aire por el que se realiza la medición.
- Variaciones en el índice de refracción del aire.

6.3.- Fuentes de error del láser escáner.-

El cálculo de errores en el láser escáner es complejo. Existen diferentes tipos de láseres, con diferentes longitudes de onda y distintas formas de emitir el haz del láser. Además de un gran componente de elementos electrónicos y mecánicos que inducen al error (Reshetyuk, 2006).

Los errores del láser escáner se pueden dividir en cuatro grupos: instrumentales, relacionados con los objetos, ambientales y metodológicos (Staiger, 2005).

6.3.1.- Errores instrumentales.-

Los errores instrumentales pueden ser sistemáticos o aleatorios y dependen del láser escáner. Los errores aleatorios afectan a la precisión de las medidas y la localización de los ángulos. Los errores sistemáticos pueden ser generados por la no linealidad del sistema de medición de tiempo o temperatura, esto influye en las mediciones electrónicas provocando retardo en la distancia (Coșarcă et al., 2009).

Propagación del haz láser

La divergencia del haz es la anchura que alcanza el haz con la distancia recorrida. La divergencia del haz tiene una fuerte influencia con la resolución de la nube, así como en la ambigüedad posicional del punto medido. La divergencia del haz se puede expresar mediante la siguiente ecuación (Weichel, 1990) (Lerma y Biosca, 2008):

$$w(\rho_w) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda\rho_w}{\pi w_0^2}\right)^2}$$

donde:

- ρ_w = la distancia respecto de la circunferencia del haz.
- w = radio del haz.

- w_0 = radio mínimo del haz en el punto inicial = circunferencia del haz.

Problema del borde partido

Cuando el haz láser choca justo en un borde, éste se divide en dos y pueden suceder dos cosas. Primera, una parte del haz refleja en el borde más cercano, y segunda la otra parte del haz refleja en una superficie más lejana. Esto se convierte en ruido ya que el escáner recibe dos pulsos desde espacios diferentes.

Ambigüedad de la distancia

Para un escáner basado en el tiempo de vuelo, la precisión en la distancia depende del mecanismo del reloj. Esto nos lleva a la siguiente ecuación:

$$\delta_z \approx \frac{c \cdot T_t}{2\sqrt{SNR}}$$

donde:

T_t : es el tiempo de lanzamiento del pulso.

SNR: es la razón señal ruido.

La mayoría de los escáneres terrestres de medio y largo alcance proporcionan una ambigüedad en la distancia de entre 5 mm y 50 mm para una distancia de 50 m. En la fase de modelado, estos errores son minimizados al hacer la media o al ajustar formas primitivas a la nube de puntos (Lerma y Biosca, 2008).

Ambigüedad angular

Los láseres escáner utilizan espejos rotatorios para enviar el haz a una posición determinada. Las precisiones angulares dependen de la correcta posición de los espejos. Como la posición de puntos aislados es difícil de verificar, se conocen pocas investigaciones acerca de este problema. Como se describe en (Boehler y Bordas, 2003), los errores se pueden detectar midiendo distancias horizontales y verticales cortas entre objetos (por ejemplo, esferas) situados a la misma distancia del escáner y comparando estas mediciones con otras realizadas con métodos topográficos más precisos (Reshetyuk, 2006).

Errores en los ejes de un láser escáner terrestre

El primer paso en el proceso de calibración de un láser escáner es obtener el modelo geométrico del escáner. Se definen los siguientes ejes como (Reshetyuk, 2006):

- Eje vertical: Permite al escáner mover el haz láser de forma horizontal.
- Eje de colimación: Eje que pasa por el centro del espejo de escaneado y el centro de la huella del láser sobre la superficie del objeto escaneado.
- Eje horizontal: Eje de rotación del espejo de barrido.

6.3.2.- Errores relacionados con los objetos.-

Se asocia con los objetos que están siendo escaneados. La principal fuente de error es la reflectancia de la superficie del objeto. La reflectancia se define como la relación entre lo reflejado y la potencia del láser (Ingesand y Schulz, 2003). Va en función de los siguientes factores: propiedades del objeto, color de la superficie, ángulo de incidencia del láser, rugosidad de la superficie y temperatura de la superficie (Figura 26).

La relación entre la intensidad reflejada del láser y la reflectancia de una superficie es comúnmente descrita por el modelo geométrico lambertiano (Reshetyuk, 2006):

$$I_{reflejada} = I_i(\lambda)k_d(\lambda) \cos \theta$$

donde:

$I_i(\lambda)$: es la intensidad de la luz incidente como función de una longitud de onda (color), es absorbida cuando viaja en el aire.

$k_d(\lambda)$: es el coeficiente de reflexión difusa que también es función de la longitud de onda.

θ : es entre la luz incidente y el vector normal de la superficie.

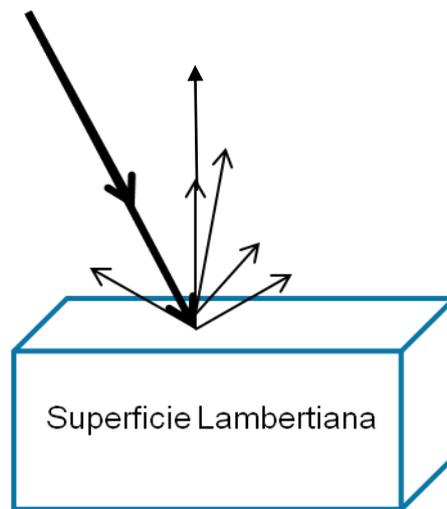


Figura 26.- Reflexión sobre una superficie lambertiana (elaboración propia).

Esta fórmula muestra que el haz láser está afectado por la absorción de la señal que viaja por el aire, la reflexión del material sobre el que se mide y el ángulo de incidencia entre el haz láser y la superficie medida. En superficies oscuras (absorben la mayor parte del espectro) la señal reflejada es muy débil y ruidosa. Las superficies que tienen alta reflectividad ofrecen valores más fiables, excepto las superficies metálicas reflectantes (Lerma y Biosca, 2008).

6.3.3.- Condiciones ambientales.-

Condiciones ambientales

Es necesario tener en cuenta la temperatura, no sólo la externa si no también la interna. Un exceso de temperatura interna causada por la temperatura externa puede causar error

en las medidas debido a la dilatación de algún componente, en situaciones extremas de calor el escáner se calienta en exceso y deja de funcionar.

En condiciones adversas como pueden ser, lluvia, niebla, nieve o frío el escáner tampoco funciona correctamente. Por debajo de 0 grados centígrados la mayoría de escáneres dejan de funcionar. La niebla atenúa el láser y no permite que la señal vuelva. La lluvia dispersa el haz láser y ruido.

Atmósfera

Como en todas las operaciones de medición de distancias, los errores naturales provienen principalmente de las variaciones atmosféricas de temperatura, presión y humedad, lo que afecta al índice de refracción y modifica la longitud de onda electromagnética. Esto significa que la velocidad de la luz del láser depende en gran medida de la densidad del aire.

Interferencia de radiación

Las fuentes de iluminación externa como puede ser una lámpara, pueden generar error en la medida de distancias, esto se debe a que los láseres escáner trabajan en bandas de frecuencia muy estrechas.

Distorsión por movimiento

Con el fin de lograr resultados de precisión durante el escaneado es de gran importancia que el instrumento no se mueva con respecto al objeto. El objetivo es que no haya movimientos relativos entre el objeto y el escáner. Sin embargo, la toma de datos del escáner está sometida a vibraciones (Reshetyuk, 2006):

- 1.- La velocidad del escáner al moverse en el eje horizontal produce vibraciones.
- 2.- La no estabilidad del trípode debido a vibraciones ocasionadas por transeúntes o vehículos.
- 3.- Tomas de datos realizadas en andamios.
- 4.- La fuerza del viento, puede causar vibraciones o rotaciones en el escáner.

6.3.4.- Errores metodológicos.-

Estos errores se deben al método topográfico elegido o a la experiencia del usuario. Por ejemplo, si el usuario establece una densidad de malla (resolución) más alta que la precisión por punto del escáner, el escaneado estará sobremuestreado, esto genera mucho ruido (Lerma y Biosca, 2008). Otro ejemplo puede ser la mala elección del láser escáner, no es correcto utilizar un escáner con precisión de 6 mm cuando lo que queremos escanear son figuras de 3 cm.

También se generan numerosos errores a la hora de registrar distintas nubes en una sola nube de puntos. Ya sea por el método punto a punto o por el método de dianas. Otro error suele producirse cuando se georreferencia la nube de puntos a un sistema absoluto, esto es la conversión de un sistema a otro genera errores.

6.4.- Estado actual de un láser escáner.-

Actualmente los láseres escáner llevan incorporados cámaras digitales para dotar de color natural a las nubes de puntos, esta tecnología a pesar de que es un gran avance necesita mejorarse. Los escáneres están completamente integrados en una sola pieza, con el panel de control, batería y memoria de almacenamiento. La tecnología está en continua evolución, los accesorios de los que se dispone en la actualidad mejorarán y se implementarán otros que facilitarán el trabajo al usuario (Tabla 2).

Escáner/Criterios	Riegl VZ-6000	Leica ScanStation C10	FARO Focus 3D	Z+F IMAGER 5006
Método de escaneado	Tiempo de vuelo		Diferencia de fase	
Campo de visión (°)	360x60	360x270	360x320	360x320
Distancia de escaneado (m)	6000	300	120	187.3
Resolución angular (°)	Vertical	0.0010	0.001	0.009
	Horizontal	0.0008	0.001	0.00076
Precisión 3D de escaneado	15mm/100m	6mm/50m	2mm.	n.a.
Velocidad de escaneado	≤ 222000pts/s	50000pts/s	976000pts/s	≤ 500000pt/s
Cámara	integrada	integrada	integrada	integrada
Sensor de inclinación	compensador	compensador	si	si

Tabla 2.- Tipos de láser escáner (elaboración propia).

7.- Termografía.-

7.1.- Evolución histórica de la termografía.-

Sir William Herschel (1738) fue el descubridor de la región infrarroja del espectro electromagnético (Figura 20). Nació en Hannover, Alemania. Cuando cumplió la mayoría de edad se trasladó a Inglaterra para convertirse en el astrónomo del rey Jorge III. Descompuso la luz solar con un prisma obteniendo los colores que la forman. A continuación se dedica a realizar la medición de las temperaturas correspondientes a cada una de las zonas de distinto color. Para su sorpresa, observa que el termómetro muestra la mayor subida en una banda inmediatamente contigua a la banda roja del espectro visible. Se da cuenta de que se trata de una manifestación de luz invisible por completo al ojo humano. La denominó ultrarroja; es decir, más allá del rojo (Erasmus, 2013).

La primera imagen térmica la hizo el hijo de William Herschel, Jhon Herschel en el año 1840.

Como en muchos otros campos, los ejércitos empezaron a desarrollar la termografía por necesidades militares. Fue a partir del año 1900 cuando se empezaron a crear patentes para la detección de personas, barcos, aviones...

En 1990 se concede a Honeywell la patente de los microbolómetros, que permite el uso en aplicaciones que no sean militares (ITIR, 2013).

En el año 1997 se desarrollan las primeras cámaras con detectores de plano focal no refrigerados de 320x240 (ITIR, 2013).

7.2.- Definición de termografía.-

La termografía, a través de la radiación que emiten los cuerpos es capaz de medir temperaturas a distancia, es decir, sin contacto directo. Lo hace convirtiendo la energía radiada en información de temperatura.

Todos los objetos tienen una información térmica, imperceptible a simple vista pero que se pone de manifiesto mediante las cámaras termográficas.

Una imagen radiométrica es una imagen que contiene cálculos de las medidas de temperatura en todos los puntos de la imagen (Melgosa, 2011).

7.3.- Importancia de la termografía.-

La importancia de la termografía se debe:

- 1.- Las mediciones se realizan en tiempo real.
- 2.- La técnica no es invasiva, se mide sin contacto directo. El termógrafo tan solo observa la radiación saliente del objeto.
- 3.- Es bidimensional, es decir, se puede medir la temperatura en dos o más puntos de un mismo objeto en el mismo instante.
- 4.- Las imágenes térmicas nos permiten detectar patrones térmicos, información muy útil para localizar humedades.

7.4.- Emisión, reflexión y transmisión.-

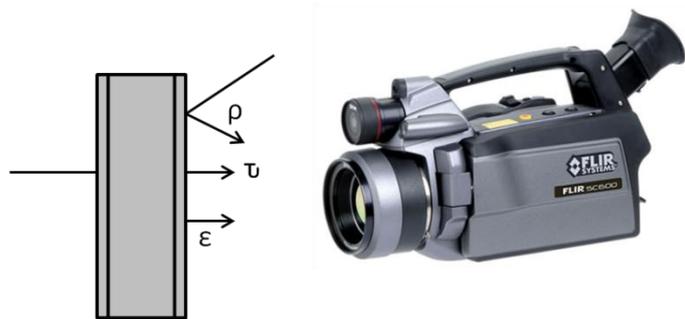


Figura 27.- Emisión (ϵ), reflexión (ρ) y transmisión (τ) (elaboración propia).

La radiación captada por la cámara termográfica procede de las radiaciones emitidas, reflejadas y transmitidas de los objetos visualizados por la cámara (Figura 27).

1.- Emisividad (ϵ):

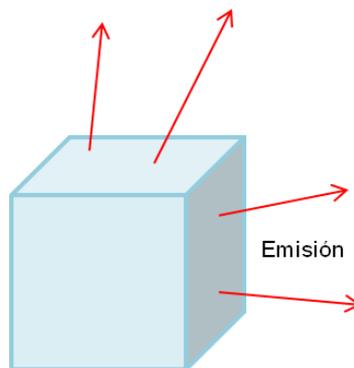


Figura 28.- Emisión (ϵ) (elaboración propia).

La emisividad es la capacidad que tiene un material de emitir radiación infrarroja. No todos los objetos emiten por igual, son varios los factores que lo determinan. La emisividad máxima es 1, únicamente se da en los cuerpos negros. Las emisividades más bajas son los metales (Figura 28).

2.- Reflexión (ρ):

La reflexión es la capacidad que tiene un objeto de reflejar la radiación de manera, que las superficies lisas tienden a reflejar más que aquellas que son irregulares (Figura 29).

Aquellas superficies que reflejan más (metales) deben ser termografiadas desde distintos ángulos, porque el ángulo de reflexión de la radiación reflejada es siempre el mismo que el ángulo de incidencia. Esto se hace para comprobar si se termografía una reflexión.

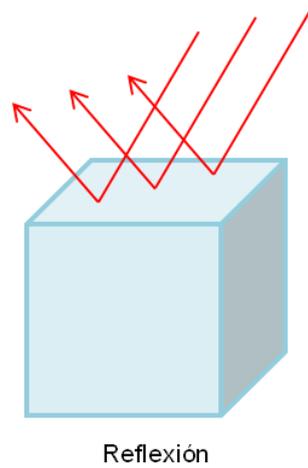


Figura 29.- Reflexión (ρ) (elaboración propia).

3.- Transmisión (τ):

La transmisión es la capacidad que tiene un material de transmitir la radiación infrarroja (Figura 30).

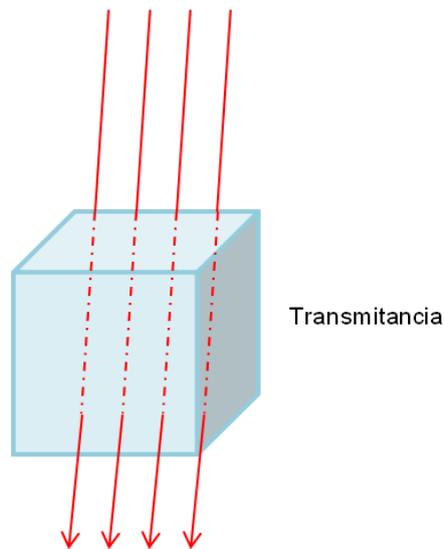


Figura 30.- Transmitancia (τ) (elaboración propia).

La radiación infrarroja registrada por la cámara termográfica consiste en:

- La radiación emitida por el objeto medido.
- La reflexión de la radiación ambiente.
- La transmisión de la radiación del objeto medido.

El resultado de la suma de estos tres valores es siempre igual a 1.

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1$$

Dado que en la práctica la transmisión juega un papel inapreciable, la variable τ se omite en la fórmula.

$$\varepsilon + \rho = 1$$

En termografía esto quiere decir que a menor emisividad mayor proporción de radiación infrarroja reflejada, mayor dificultad en la toma de mediciones precisas de temperatura y mayor importancia adquiere la configuración correcta de la compensación de la temperatura reflejada (Testo, 2008).

Tipo de onda	Radiación	Longitud de onda
Corta	IR-A	760-2.000 nm
Media	IR-B	2.000-4.000 nm
Larga	IR-C	4.000-10.000 nm

Tabla 3.- Bandas de longitud de onda (elaboración propia).

El espectro infrarrojo se extiende desde el límite del rango visible hasta llegar a la región de las microondas. Sin embargo, existen dos regiones donde la transmisión es más elevada, la zona de 760-2.000 nm (sistemas de onda corta) y la zona de 4.000-10.000 nm (sistemas de onda larga).

La radiación infrarroja cubre tres bandas de longitud de onda diferentes (Tabla 3).

7.5.- Principios físicos.-

7.5.1.- Ley de Planck.-

Esta ley relaciona la radiación emitida, la temperatura del emisor y la longitud de onda de dicha radiación. Describe cómo se distribuye en el espectro electromagnético la radiación emitida por un cuerpo negro a una temperatura determinada (De Grado, 1998).

$$W_{\lambda n} = \frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda KT} - 1)}$$

donde:

$W_{\lambda n}$: emisión radiante del cuerpo negro [Wm^{-3}].

h: constante de Planck.

K: constante de Boltzman.

T: temperatura absoluta.

c: velocidad de la luz.

e: base neperiana.

λ : longitud de onda.

Esta expresión también puede escribirse como:

$$W_{\lambda n} = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)}$$

donde:

$$c_1 = 2\pi hc^2 = 3,74 \cdot 10^{-12} W/cm^2$$

$$c_2 = \frac{hc}{K} = 1834 \text{ cmK}$$

7.5.2.- Ley de desplazamiento de Wien.-

Esta ley relaciona la temperatura de la superficie del cuerpo con la longitud de onda con la que se radia la máxima energía. Hallando el máximo de la expresión anterior (derivando e igualando a cero) (De Grado, 1998):

$$\frac{dW_{\lambda n}}{d\lambda} = 0$$

Se obtiene:

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{2898}{T} (\mu m)$$

7.5.3.- Ley de Stefan-Boltzman.-

Da a conocer la totalidad de la energía emitida por un cuerpo negro. Así, integrando la ecuación de Planck desde $\lambda = 0$ a $\lambda = \infty$:

$$W_n = \int_0^{\infty} W_{\lambda n} d\lambda = \sigma T^4 (W/m^2)$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzman que vale $5,7 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$.

Según aumenta la temperatura de un cuerpo, más cantidad de energía libera y más proporción de ésta entra dentro del campo visible. Traspasando un cierto umbral de temperatura, el cuerpo se convierte en incandescente.

Toda esta información es útil para hacer una aproximación al comportamiento térmico de un objeto real, ya que el cuerpo negro es una idealización del cuerpo real. Es decir, un cuerpo real no absorbe toda la radiación que recibe, tal como hace el cuerpo negro (De Grado, 1998).

En un cuerpo real una fracción de la radiación incidente (α) se absorbe, otra fracción (ρ) se refleja y otra (τ) se transmite. Todos estos factores dependen en mayor o menor magnitud de la longitud de onda (λ).

La absorbancia espectral (α_λ) se define como la relación entre la radiación absorbida y la radiación incidente.

La reflectancia espectral (ρ_λ) es la relación entre la radiación reflejada y la radiación incidente.

La transmitancia espectral (τ_λ) se define como la relación entre la radiación transmitida y la radiación incidente.

La suma de estas tres fracciones debe ser la totalidad de la radiación. Por tanto:

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1$$

Para materiales opacos $\tau = 0$ por lo que la relación se simplifica:

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} = 1$$

La emisividad espectral (ϵ_{λ}) de una superficie es la relación entre la radiación emitida por un objeto y la que emitirá el cuerpo negro a la misma temperatura y longitud de onda.

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{W_{\lambda o}}{W_{\lambda n}}$$

El principio de conservación de la energía dice la emisividad es igual a la absorbencia a cualquier temperatura y longitud de onda. Por lo tanto un buen absorbente es un buen radiador (piel humana, metal oxidado, etc.), y que un buen reflector es un mal radiador (superficies brillantes).

La ley de Stefan-Boltzman para un cuerpo gris, se convierte en:

$$W_n = \epsilon_{\sigma} T^4 (W/m)$$

Es decir, el poder emisor total de un cuerpo gris es el del cuerpo negro a esa temperatura reducido proporcionalmente en el valor ϵ de la emisividad del cuerpo gris.

Se hace necesario conocer el valor de la emisividad del objeto para poder obtener unos datos termográficos fiables (De Grado, 1998) (Flir, 2011).

7.6.- La imagen termográfica.-

7.6.1.- Rango de temperatura, nivel y campo.-

Se define como rango de temperaturas al ajuste de la temperatura máxima y mínima que va a ser capaz de recoger la cámara termográfica. En función de la cámara suelen haber varios niveles de rango, desde $-40^{\circ}\text{C} - 150^{\circ}\text{C}$, $150^{\circ}\text{C} - 500^{\circ}\text{C}$, y $500^{\circ}\text{C} - 1500^{\circ}\text{C}$. Una vez tomada la termografía no es posible variar el rango (Figura 31).

Se define como campo al intervalo de temperaturas recogidas por la cámara en un instante dado. El ancho del campo se puede detectar de forma automática por la cámara, seleccionando las temperaturas máxima y mínima del encuadre y de forma manual por el usuario, pudiendo estrechar y ensanchar el campo. A diferencia del rango, el campo se puede variar en postproceso (Figura 31).

Se define como nivel al punto medio del campo, por tanto, si el campo varía, el nivel también (ITC, 2011).

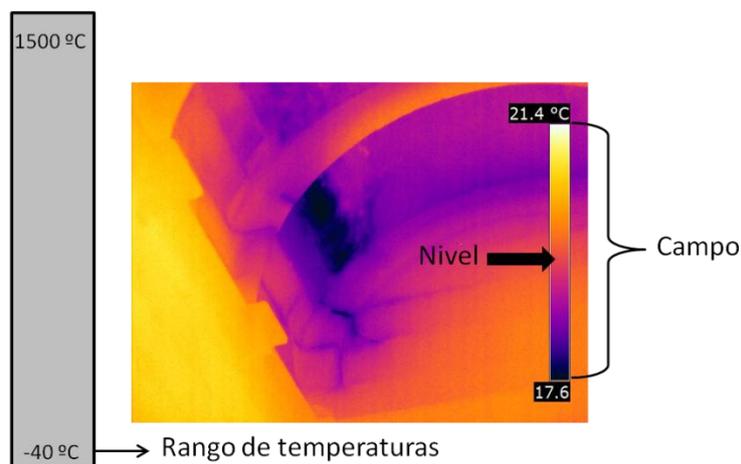


Figura 31.- Rango, campo y nivel (elaboración propia).

7.6.2.- Características de la resolución.-

La resolución de la imagen térmica está definida por (Figura 32):

- **Píxel:** Se define como la menor unidad en la que se descompone una imagen digital.
- **FOV:** Campo de visión. Define el tamaño de lo que se ve en la imagen térmica.
- **IFOV:** Campo de visión instantáneo. Define la resolución geométrica de la cámara, cada píxel tiene un cierto tamaño en la imagen llamado IFOV. Es una medida angular y se expresa en miliradianes (mRad).

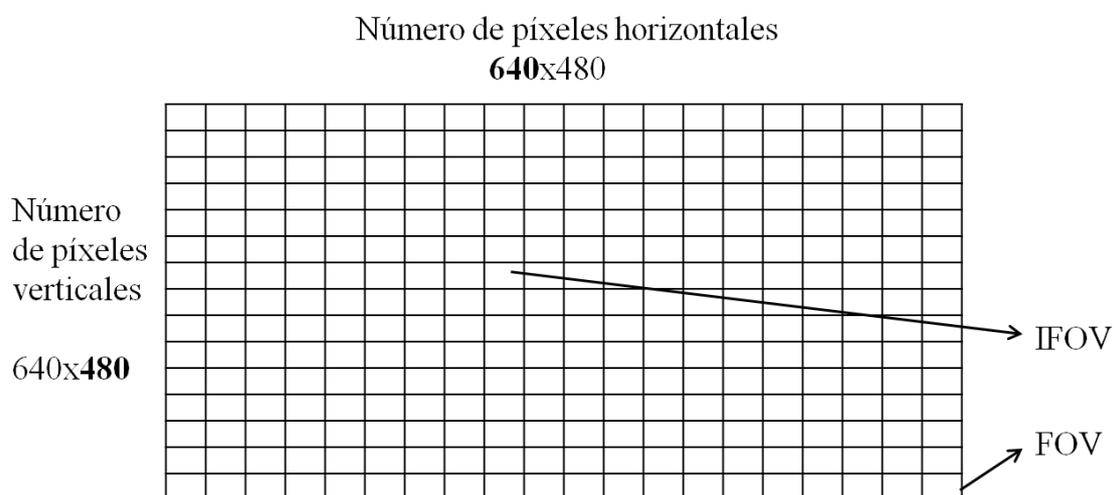


Figura 32.- Píxel, FOV e IFOV (elaboración propia).

7.6.3.- Forma de tomar una imagen térmica.-

La forma óptima de tomar una imagen térmica es la siguiente:

- 1.- Rango de temperatura, se debe corresponder el rango fijado con el objeto que se va a termografiar.

- 2.- Enfoque, para poder medir temperaturas es fundamental que la imagen esté correctamente enfocada.
- 3.- Composición, es muy importante recoger en la cámara el objeto que se desee termografiar.

Estos tres puntos, el rango de temperaturas, el enfoque y la composición no se pueden modificar en postproceso (ITC, 2011).

7.6.4.- Métodos de análisis de las imágenes térmicas.-

Existen dos tipos de análisis sobre las imágenes térmicas, el cualitativo y el cuantitativo. Antes de describirlos es necesario conocer unos conceptos.

Una imagen térmica no se corresponde con una distribución de temperaturas, sino con una distribución de radiación térmica.

Diferencias en intensidades de radiación no se traducen en diferencias de temperatura. Esto quiere decir, que un mismo objeto sobre el que se está trabajando, puede estar a la misma temperatura, pero con distintas emisividades. Por tanto, la imagen térmica aparecerá con un contraste reflejado en la paleta de colores que puede hacer pensar que tiene diferentes temperaturas (Melgosa, 2011) (ITC, 2011).



Figura 33.- Imagen infrarroja de las dos cristales de una puerta (elaboración propia).

La imagen de la figura 33 muestra dos ventanas de una puerta, donde existen casi dos grados de diferencia entre las dos, esto se debe a que el operador está reflejado en una de ellas. La temperatura en ambas ventanas es la misma, lo que sucede es que el reflejo de la cámara da lugar a una radiación reflejada más elevada.

La zona en la que el operador aparece reflejado tiene mayor radiación, esto no significa que la temperatura también sea mayor, es igual. Esto significa que la imagen muestra la temperatura aparente.

La temperatura aparente se define como la temperatura leída y no compensada en la cámara termográfica.

Conociendo esta información, el termógrafo es capaz de realizar dos tipos de análisis en función del grado de exactitud: cualitativo o cuantitativo.

Análisis cualitativo

Es el primer análisis que realiza el termógrafo, el cual se centra en analizar la imagen térmica para localizar y evaluar posibles anomalías.

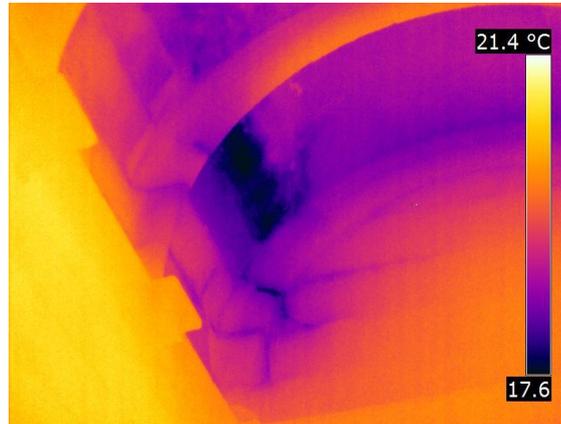


Figura 34.- Imagen infrarroja. Humedad Sala del Archivo (elaboración propia).

La mancha azul oscura de la sala del archivo de la Catedral (Figura 34) revela la presencia de una humedad. Este análisis se hace con la temperatura aparente, sin compensación.

Análisis cuantitativo

Se define análisis cuantitativo, al análisis de las temperaturas tomadas en una imagen para determinar anomalías y adoptar soluciones.

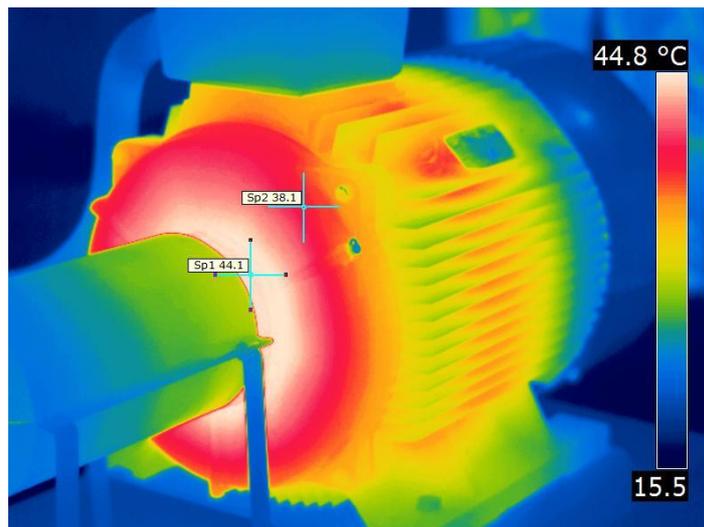


Figura 35.- Imagen infrarroja de un motor recalentado (elaboración propia).

En la figura 35 se puede hacer un análisis simplemente cualitativo, indicando que una zona del motor está recalentada. Pero para cuantificar esa anomalía se hace necesario

conocer la temperatura de ciertos puntos del motor para así poder comparar. Este análisis se realiza con temperaturas reales, con compensación de los parámetros de objeto de emisividad y temperatura aparente reflejada.

También hay que tener y usar datos de referencia, es decir, datos históricos que permitan saber si una temperatura es elevada o baja para un mismo componente, y cuánto lo es respecto al mismo componente en estado normal.

7.6.5.- Cómo se compensa la imagen térmica.-

Las imágenes térmicas se pueden compensar “in situ” sobre la cámara o en postproceso con el software de tratamiento de imágenes térmicas.

Los parámetros con los que se ha de compensar una imagen térmica son, temperatura aparente reflejada, emisividad, distancia, temperatura exterior y humedad relativa. La correcta configuración de estos parámetros permitirá obtener temperaturas reales (ITC, 2011).

Efectos de la emisividad sobre la imagen térmica:

- Cuando se mide un cuerpo con alta emisividad, la temperatura aparente del cuerpo es cercana a la temperatura real. Se puede decir que se asemeja a la realidad.
- Cuando se mide un cuerpo con baja emisividad, la temperatura aparente del cuerpo es cercana a las temperaturas aparentes de los cuerpos cercanos. No se asemeja a la realidad y no se puede medir. Una solución es utilizar pintura o cinta aislante.

PARTE IV: METODOLOGÍA DE TRABAJO

8.- Red de control posicional tridimensional.-

8.1.- Planteamiento.-

8.1.1.- Objetivos.-

Para el estudio de deformaciones en la estructura de la Catedral de Santa María de la Asunción de Coria, se hace necesario conocer el comportamiento de la base sobre la que se asienta la edificación. Para ello, se ha establecido y calculado una red geodésica local de alta precisión controlada por observaciones de Sistemas Globales de Navegación por Satélite GNSS (GPS + GLONASS) y completada con observaciones de nivelación geométrica. Las observaciones GNSS son comúnmente empleadas para la detección y cuantificación de posibles movimientos tectónicos.

La red diseñada está compuesta por 9 bases GNSS en dos categorías, red externa e interna, y una serie de puntos de control altimétrico sobre el edificio:

- Red Externa GNSS: Se establece una primera Red Externa de control tridimensional (XYZ) fuera de la posible zona de influencia de la Catedral.
- Red de Proximidad GNSS: Se establece una segunda Red de Proximidad de control tridimensional (XYZ) en la posible zona de influencia de la Catedral.
- Red Interna de Nivelación Geométrica: Basada en la Red de Proximidad, se establece una última Red Interna de control altimétrico (Z) sobre puntos exteriores del edificio.

El enlace de las tres redes permite el análisis del posible hundimiento o deformaciones 3D de la zona circundante a la Catedral, lo cual pudiera estar afectando a la estructura del edificio.

8.1.2.- Instrumentación.-

En la observación se han empleado equipos Leica SR500 bifrecuencia (GPS) y Leica 1200 bifrecuencia (GPS + GLONASS). En la nivelación geométrica se ha utilizado el nivel Leica NA 3003.

8.1.3.- Monumentación.-

Todos los puntos de dichas redes han sido materializados sobre el terreno mediante tornillos hormigonados en elementos estables: muros, acerado, obras de fábrica, suelo, etc. De esta forma se ha asegurado la estabilidad de las bases a lo largo del tiempo sobre el terreno.

8.1.4.- Metodología.-

Se establece una Red Exterior de 4 bases en zonas estables y circundantes a la zona de trabajo. La red está enlazada con la estación permanente GNSS CORI (Coria), perteneciente a la Red Extremeña de Posicionamiento (REP).

La observación se realiza empleando cuatro equipos simultáneamente, método de observación estático, durante un período de tiempo suficiente para obtener redundancia en la observación y para que se garantice una precisión estimada de 3 mm (precisión estimada de la red en coordenadas relativas entre las cuatro bases).

Se establece una segunda red, Red de Proximidad, compuesta por 5 bases en la zona de la Catedral. Las bases se ha procurado que estén situadas en zonas accesibles y con el mayor horizonte despejado posible.

La Red de Proximidad está enlazada con la Red Exterior durante la observación GNSS, con al menos dos bases simultáneas.

Al finalizar el trabajo de campo, en el terminal de los equipos GNSS quedan almacenados en ficheros digitales, con el nombre de fichero que se haya introducido para el trabajo, el identificador y las coordenadas WGS-84 de las bases de nueva implantación. A continuación, se descargan los datos RINEX de la estación permanente GNSS CORI. En estos ficheros vienen datos de mensajes de navegación, el estado de los satélites, y los datos de código y fase registrados.

Los datos son descargados en el programa informático LEICA Geo Office y se procede a realizar el cálculo de las coordenadas UTM ETRS89. Posteriormente, analizando cada línea base, se realiza un ajuste por mínimos cuadrados resultando la solución final de las coordenadas de las bases. Este ajuste por mínimos cuadrados además de ajustar las coordenadas presenta los valores de los residuos, que dan una idea de la precisión y fiabilidad de los datos obtenidos.

8.1.5.- Seguimiento de la Red de Control Posicional Tridimensional.-

Para el estudio de deformaciones en la estructura de la Catedral de Santa María de la Asunción de Coria, no sólo es necesario el establecimiento y cálculo de la Red de Control Posicional, sino que se hace necesario un seguimiento cada cierto intervalo de tiempo.

Para poder apreciar diferencias posicionales superiores a los 3 mm estimados en la propia precisión de la Red, es necesario realizar observaciones periódicas mediante el siguiente procedimiento:

- 1º. Verificar mediante el enlace de, al menos, una base de la Red Externa con dos bases de la Red de Proximidad la estabilidad posicional de la RP. Esta observación se realiza en postproceso mediante equipos GNSS. Deberá comprobarse que las coordenadas no difieren más de 2 mm de las coordenadas establecidas en el cálculo inicial de las redes.
- 2º. Verificar la altimetría de la Red Interna mediante un anillo de Nivelación geométrica cerrado pasando por todos los puntos de la Red de Proximidad y su posterior compensación.

8.1.6.- Resultados esperados y líneas de actuación.-

Los resultados esperados con la observación periódica son:

- En el caso de que no se detecten cambios 3D > 3 mm en la RP con respecto a la RE, significará que la zona circundante a la Catedral no ha sufrido deformaciones en el periodo analizado. Si se detectasen deformaciones, sería recomendable realizar nuevas observaciones de campo empleando las 4 bases de la RE junto con las 5 bases de la RP para cuantificar las variaciones 3D de la RP.

- Si se detectasen variaciones altimétricas (Z) entre los puntos ubicados en la fachada del edificio (de la RI) y los puntos de control de la RP, significará que se ha producido un proceso de hundimiento ó deslizamiento en la base sobre la que se asienta la Catedral.
- Si el proceso de hundimiento ó deslizamiento es superior a 3 mm, éste podrá cuantificarse tanto si se produce sobre los puntos de control ubicados en la fachada del edificio (RI) como si se produce sobre la zona circundante al mismo (RP).

8.2.- Red Externa GNSS.-

La Red Exterior se encuentra situada de forma circundante a la ciudad de Coria en un radio medio de 1300 m (entre 600 y 2000m). Dicha red se ha establecido sobre elementos estables y no susceptibles de desplazamientos con el paso del tiempo. Asimismo, los puntos se han situado en zonas con una visibilidad aceptable del horizonte del lugar para facilitar la observación satelital GNSS (Figura 36).



Figura 36.- Red Externa GNSS.

8.3.- Red de Proximidad GNSS.-

La Red de Proximidad está situada en las proximidades de la Catedral de Coria. Su distribución se ha establecido alrededor de la Catedral para determinar posibles desplazamientos en el suelo que rodea el edificio. Si bien estos puntos pueden servir para detectar y cuantificar dichos desplazamientos, al servir de apoyo a una Red de Nivelación, será ésta red la que determine y cuantifique posibles desplazamientos verticales en la base del edificio. El mayor inconveniente se encuentra en la propia geometría de la zona circundante (edificios elevados, arboleda y vegetación...), dado que ésta ocasiona numerosas obstrucciones en la observación satelital de la red (Figura 37).



Figura 37.- Red de Proximidad.

8.4.- Coordenadas.-

8.4.1.- Coordenadas de la campaña 2012.-

Red EXTERNA	Coordenadas			Calidad estimada	
	X	Y	H	QXY	QH
CARRETERA	710579,447	4427574,618	278,159	0,001	0,001
CORIA	711791,015	4428663,838	298,452	0,000	0,000
GASOLINERA	711730,022	4427231,374	284,791	0,001	0,002
PISTA	709773,130	4428894,130	298,098	0,001	0,002
POLIGONO	710967,302	4429787,722	325,011	0,001	0,001
Red PROXIMIDAD	Coordenadas			Calidad estimada	
	X	Y	H	QXY	QH
BARANDA_E	710333,079	4428649,532	316,728	0,000	0,000
BARANDA_W	710288,287	4428629,047	316,604	0,002	0,001
MURO	710277,962	4428635,840	318,971	0,000	0,000
PLAZA_3	710289,108	4428732,371	318,466	0,001	0,001
PLAZA_4	710293,692	4428731,980	318,267	0,002	0,001

Tabla 4.- Coordenadas calculadas.

Red EXTERNA	Coordenadas			Calidad estimada		Fiabilidad del ajuste		
	X	Y	H	QXY	QH	FX	FY	FH
CARRETERA	710579,447	4427574,617	278,159	0,002	0,004	0,003	-0,002	0,003
CORIA	711791,015	4428663,838	298,452	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
GASOLINERA	711730,022	4427231,374	284,791	0,003	0,004	0,003	-0,002	0,003
PISTA	709773,129	4428894,129	298,097	0,002	0,004	0,003	-0,002	0,003
POLIGONO	710967,302	4429787,722	325,011	0,002	0,004	0,003	-0,003	0,003
Red PROXIMIDAD	Coordenadas			Calidad estimada		Fiabilidad del ajuste		
	X	Y	H	QXY	QH	FX	FY	FH
BARANDA_E	710333,081	4428649,532	316,725	0,003	0,006	0,004	-0,005	0,006
BARANDA_W	710288,288	4428629,046	316,603	0,003	0,005	0,003	-0,002	0,003
MURO	710277,961	4428635,840	318,975	0,003	0,006	0,003	-0,004	0,004
PLAZA_3	710289,107	4428732,371	318,472	0,007	0,012	0,006	-0,010	0,012
PLAZA_4	710293,690	4428731,979	318,270	0,004	0,007	0,003	-0,005	0,006

Tabla 5.- Coordenadas ajustadas.

8.4.2.- Coordenadas de la campaña 2013.-

Red PROXIMIDAD	Coordenadas			Calidad estimada		Fiabilidad del ajuste		
	X	Y	H	QXY	QH	FX	FY	FH
BARANDA_E	710333,082	4428649,533	316,734	0,002	0,003	0,003	-0,003	0,004
BARANDA_W	710288,286	4428629,051	316,593	0,001	0,002	0,002	-0,002	0,002
MURO	710277,958	4428635,838	318,977	0,001	0,002	0,002	-0,002	0,003
PLAZA_3	710289,090	4428732,381	318,440	0,003	0,005	0,003	-0,004	0,005
PLAZA_4	710293,690	4428731,980	318,281	0,002	0,004	0,002	-0,003	0,004

Tabla 6.- Coordenadas ajustadas.

8.5.- Resultados.-

Red PROXIMIDAD	Coordenadas			Calidad estimada		Fiabilidad del ajuste		
	X	Y	H	QXY	QH	FX	FY	FH
BARANDA_E	0,001	0,001	0,009	-0,002	-0,003	-0,001	0,002	-0,002
BARANDA_W	-0,002	0,005	-0,010	-0,001	-0,002	-0,001	0,001	-0,001
MURO	-0,002	-0,003	0,002	-0,002	-0,003	-0,001	0,001	-0,002
PLAZA_3	-0,017	0,010	-0,031	-0,005	-0,007	-0,003	0,007	-0,008
PLAZA_4	0,000	0,001	0,010	-0,002	-0,003	-0,001	0,002	-0,003

Tabla 7.- Resultados comparativos de 2012 y 2013.

Las tomas de datos se tomaron en dos campañas distintas, la primera el 23 de abril de 2012 y la segunda el 5 de marzo de 2013.

La red Externa se ha observado y procesado enlazándola con la estación de la Red Extremeña de Posicionamiento de “CORIA”.

Como se puede observar en la (Tabla 5), el indicador de la calidad de las coordenadas ajustadas en todos los casos es de 2 o 3 mm para las coordenadas planimétricas (XY), mientras que el de la altura elipsoidal (H) es de 4 mm (excepto para la estación de referencia “CORIA” que, lógicamente, es 0 para todos los casos). Ello es debido a que las condiciones de observación han sido óptimas para las zonas observadas en función de la longitud de las líneas-base medidas (desde los 1540 m hasta los 2660 m), a pesar de las dificultades por posibles obstrucciones de la señal en determinados momentos (acceso de vehículos a la gasolinera, transeúntes, tráfico rodado en las proximidades de las bases...). No obstante, la fiabilidad alcanzada en el cálculo de la red ha sido muy aceptable en todos los casos (≤ 3 mm).

La Red de Proximidad es la que mayores dificultades ha tenido debido a diferentes factores:

- Dificultad en la ubicación de las bases (accesibilidad, estabilidad y robustez de las señales ante el paso del tiempo...).
- Errores por oclusión u obstrucción de los satélites.
- Errores por rebote de la señal multicamino (multipath).
- Errores por saltos de ciclo en la resolución de ambigüedades.

Por todo ello, se ha puesto especial cuidado en el análisis del procesado de cada una de las líneas-base posibles de la red, analizándose de forma individualizada los errores y las diferencias de posición en el cálculo de cada observación. La base “PLAZA 3” presenta unos errores que no son aceptables, posiblemente debido al efecto multicamino, que no ha podido ser eliminado.

En una primera fase se ha procedido al cálculo de las coordenadas y el análisis de resultados (Tabla 7). Si se observan los excelentes resultados, en todo momento se han alcanzado precisiones en calidad horizontal y en altura elipsoidal ≤ 2 mm.

No obstante, y dadas las especiales características de este tipo de observaciones GNSS que se han indicado al comienzo de este apartado (errores y dificultades añadidas), se ha considerado el obtener datos de FIABILIDAD de la RED GNSS mediante el ajuste por mínimos cuadrados de dicha red. De esta forma, se han obtenido los datos mostrados en la Tabla 8. Al realizar el ajuste, podemos conocer los datos de FIABILIDAD en la obtención de cada una de las 3 coordenadas (XYH) de los distintos puntos (ver las tres últimas columnas de la tabla). Asimismo, el propio ajuste por mínimos cuadrados redistribuye los errores entre todas las observaciones y modifica los valores de calidad posicional horizontal y altimétrica de cada punto. Es por ello, por lo que los valores relativos a la precisión de cada observación se ven incrementados respecto a los mostrados en la (Tabla 7).

La decisión de recomendar el empleo de este segundo conjunto de datos (Tabla 8) es el hecho de que nos ofrece, precisamente, valores de fiabilidad en cada una de las

observaciones realizadas, así como una mejor estimación de la incertidumbre al proporcionar las coordenadas de cada punto.

Cabe recordar que, dada la propia ubicación de la Catedral de Coria, las precisiones alcanzadas han sido muy elevadas y difícilmente superables por las propias condiciones del entorno: arboleda y vegetación, edificaciones circundantes (entre ellas, la propia Catedral), tráfico rodado y de transeúntes... Se ha puesto especial cuidado en acotar al máximo el paso de vehículos y personas cerca de las antenas GNSS durante la observación, aunque en algunos casos esto no ha sido posible o todo lo eficaz que hubiera sido deseable.

8.6.- Red Interna de Nivelación Geométrica.-

8.6.1.- Metodología.-

La nivelación geométrica es un método de obtención de desniveles entre dos puntos, que utiliza visuales horizontales. Los equipos que se han empleado son el nivel digital Leica NA 3003 y una mira de código de barras.

Se ha realizado la nivelación geométrica por el método del punto medio. Este método consiste en estacionar el nivel entre A y B, de tal forma que la distancia existente a ambos puntos sea la misma, es decir $EA = EB$ de manera, que con esta técnica, los posibles errores “e” que pueda tener el instrumental, quedan compensados (Figura 38). En A y B se sitúan miras verticales, sobre las que se efectúan las visuales horizontales con el nivel, registrando las lecturas m_A , m_B . A la mira situada en A se le denomina *mira de espalda* y a la mira situada en B *mira de frente*. El punto de estación no está materializado por ningún tipo de señal, pero los puntos sobre los que se sitúan las miras sí lo están.

El esquema de observación es el siguiente (Figura 38):

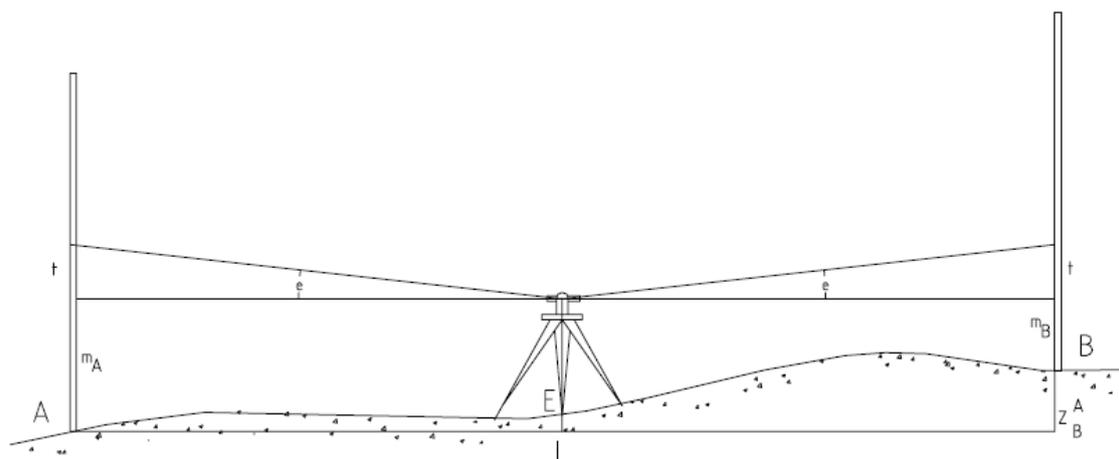


Figura 38.- Nivelación geométrica. Método del punto medio (Chueca et al., 1996).

De la figura se deduce que el desnivel de B respecto de A, ΔH_A^B , vendrá dado por la diferencia de lecturas, lectura de espalda menos lectura de frente:

$$\Delta H = m_A - m_B$$

8.6.2.- Procedimiento.-

El procedimiento ha sido el siguiente:

- Realización de un anillo de nivelación cerrado partiendo de una de las bases de la Red de Proximidad y finalizando en el punto de partida (Figura 39).
- Dicho anillo de nivelación deberá pasar por todas las bases de la Red de Proximidad. Esto servirá como punto de verificación de la precisión altimétrica alcanzada en la observación de la Red de Proximidad mediante técnicas GNSS.
- Junto con el anillo de Nivelación de Precisión, se dará cota a una serie de puntos de la Red Interna ubicados de forma permanente sobre la fachada exterior de la Catedral.
- La observación final será compensada dentro del anillo cerrado de nivelación.

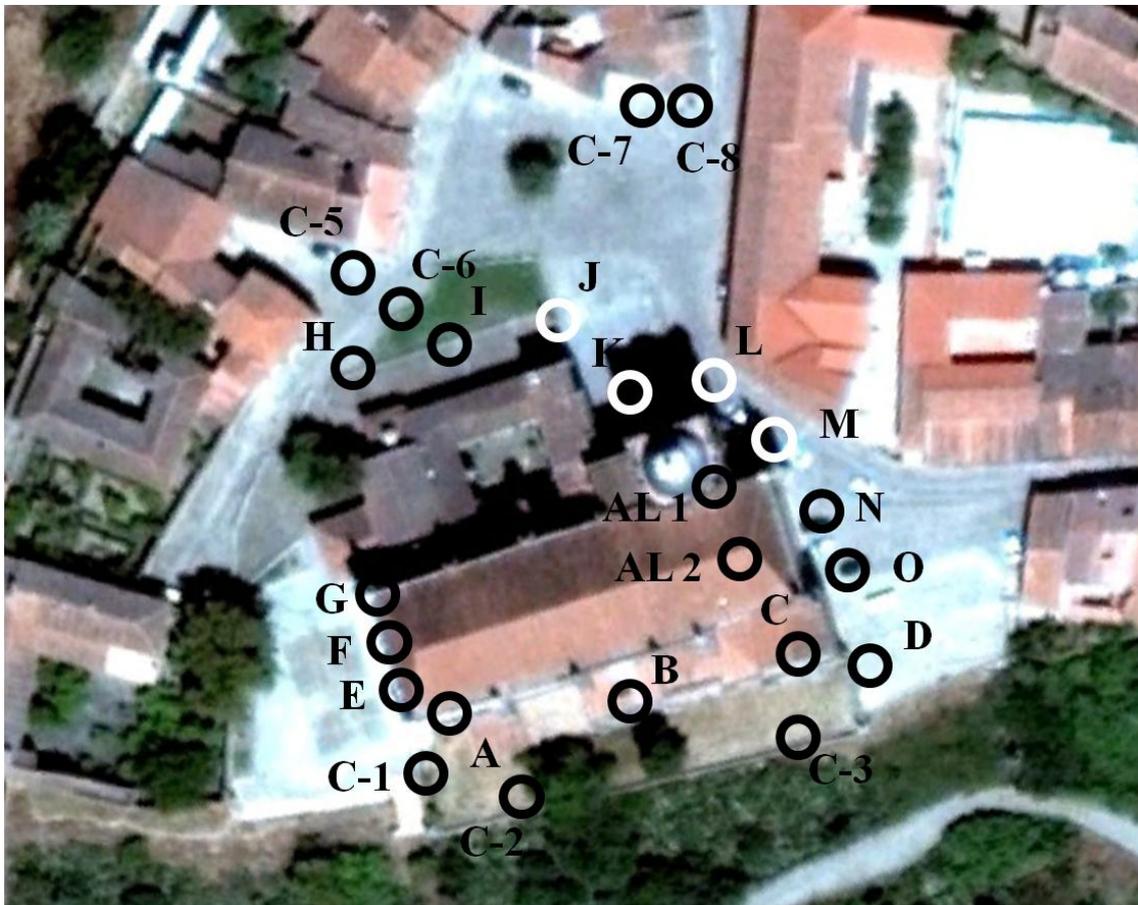


Figura 39.- Puntos de la nivelación geométrica.

8.6.3.- Resultados.-

	23 de abril de 2012	15 de marzo de 2013
A	9,914	9,914
B	10,067	10,068
C	10,218	10,217
D	10,206	10,205
E	10,744	10,744
F	10,789	10,789
G	10,787	10,786
H	12,898	12,898
I	12,792	12,793
J	12,728	12,727
K	11,317	11,317
L	12,267	12,267
M	11,190	11,190
N	10,350	10,351
O	8,899	8,899
C1	12,391	12,391
C2 ORIGEN	10,000	10,000
C3	10,154	10,153
C5	12,680	12,680
C6	12,668	12,669
C7	11,857	11,857
C8	11,688	11,687
AL1	10,283	10,282
AL2	10,269	10,268
Error de cierre	0,002	0,003

Tabla 8.- Datos de la nivelación geométrica.

Observando los datos, la diferencia del resultado final entre los dos años que se tomaron los datos es de 1 mm (Tabla 8).

8.7.- Conclusión.-

El indicador de la calidad de las coordenadas ajustadas en todos los casos es de 2 ó 3 mm para las coordenadas planimétricas, con errores mínimos y aceptables y en altimetría la diferencia de datos es de 1 mm.

Teniendo en cuenta que el año 2012 fue un año muy seco y el año 2013 muy lluvioso, dos escenarios muy distintos, y con toma de datos en ambos años, se puede afirmar que al terreno donde se asienta la Catedral no se mueve.

9.- Control de estabilidad de ladera.-

9.1.- Introducción.-

El proceso de estudio del posible deslizamiento del talud situado al sur de la Catedral, se ha realizado mediante cálculos con el programa Geo-Studio. Para el estudio del control de estabilidad de la ladera se ha seguido la metodología utilizada por el Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, D. Emilio González Abril, en colaboración con el proyecto de la Catedral titulado: “*Modelado 3d con tecnología laser de la Catedral de Coria*”, firmado por el cabildo de la Catedral de la Diócesis Coria-Cáceres y el grupo de investigación IGPU de la UEX.

La metodología llevada a cabo es la siguiente:

1.- Obtención de los datos geológicos y geotécnicos. Éstos se obtienen de dos trabajos anteriores, que han sido extraídos del proyecto dirigido por el Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos D. Jorge Juan Romo Berlana:

- El realizado por la empresa de control de calidad de materiales de construcción, Vorsevi S.A., en 1977.
- El efectuado por la empresa de Ingeniería GMC y el laboratorio de control de calidad de materiales de construcción, GEOTECAM, en 2008.

2.- Estimar, identificar y valorar la posible acción sísmica capaz de producir efectos negativos, siguiendo la Norma de Construcción Sismorresistente Española para Edificación del Ministerio de Fomento (NCSE-02).

3.- Verificar la seguridad de la construcción de la Catedral ante las acciones sísmicas que puedan actuar sobre ella siguiendo la norma NCSE-02.

4.- Estudio topográfico del talud.

5.- Introducción de los datos obtenidos en el programa Geo-Studio y obtención de resultados.

Todo esto servirá para calcular cuáles son los parámetros que se deben considerar a la hora de realizar los cálculos de estabilidad con el programa Geo-Studio, y comprobar si hay que tener en cuenta un posible movimiento sísmico en la zona que pueda afectar a la Catedral.

9.2.- Geología y geotecnia de la zona.-

9.2.1.- Trabajo de Vorsevi.-

En 1977 la empresa de control de calidad de materiales de construcción, Vorsevi S.A., realizó un trabajo de campo y de laboratorio orientado al conocimiento geológico y geotécnico del terreno sobre el que se cimenta la Catedral de Coria, así como del terreno circundante a ésta. Se realizan 7 sondeos a rotación, 6 sondeos eléctricos verticales, con las consecuentes identificaciones de materiales, granulometrías de suelos, límites de Atterberg, compresiones simples, cortes directos, hinchamientos libres, penetrómetros, SPT, etc. También se analizan los datos de 3 inclinómetros de ladera instalados en la zona (sondeos S2, S5 y S6).

Desde el punto de vista geológico los datos obtenidos son:

- Un primer nivel de terreno compuesto por material vegetal, relleno antrópico (normalmente limo-arenoso), pavimento, cascotes o basura inorgánica.

- Un segundo nivel compuesto por terrazas de depósito cuaternarias, normalmente con una cantidad de finos inferior al 35% y siendo éstos además poco o nada plásticos (son lo que en muchos sitios se denominan *rañas*, con una cierta cantidad de limos arcillosos, de cantos porfídicos-silíceos rodados).
- Y un tercer nivel de arcillas terciarias, algo limosas de media a baja plasticidad y de alta capacidad portante.

Vorsevi realiza un cálculo a deslizamiento tipo Bishop, con valores altos de ángulos de rozamiento y valores bajos de la cohesión de las arcillas y con dos situaciones: una sin nivel freático y otra con nivel freático bastante alto, teniendo en cuenta en ambas un sismo de magnitud VII (equiparable a una aceleración horizontal de casi 0.04g) y suponiendo un sobre espesor de tierras asimilable al peso de la Catedral. Queda patente en dicho cálculo que si bien sin nivel freático y con un sismo, el equilibrio del conjunto ladera-Catedral está muy justo, en cuanto se introduce nivel freático, dicho conjunto desliza. ¿Cuánto?, incluso hoy en día es difícil de cuantificar; probablemente lo justo para que la ladera no se vaya, pero sí para que se produzca un giro que provoque a su vez un pequeño hundimiento de la zona sur-este de la Catedral, con el consecuente agrietamiento y asentamiento de dicha zona.

A parte del sismo, la inclinación de la ladera respecto de la horizontal, la composición de sus materiales y del agua freática variable, la zona sur-este de la Catedral está topográficamente muy mal localizada ya que tiene próxima a ella una falla, antiguo afluyente del Alagón o sumidero geométrico que acentúa los efectos negativos antes mencionados.

No se encuentran presiones de hinchamiento importantes en la transición de las rañas a las arcillas (a unos 4.3 metros). Así mismo, la porosidad obtenida en estos terrenos arcillosos es normal (en torno a 0.55), la variación de humedad en saturación no es significativa, su asiento bajo incrementos de carga tampoco es excesivo (del orden del 1.5 al 2%). También podemos decir que las muestras de arcillas ensayadas tienen una resistencia a compresión simple de alta a muy alta (de 2.7 a 3.42 kp/cm²), lo cual no es correlativo con arcillas expansivas. Por otra parte, las arcillas expansivas suelen tener tensiones efectivas con bajos ángulos de rozamientos (por debajo de 10) y altas cohesiones (por encima de 1.75 a 2 kp/cm²), cosa que no ocurre en ninguno de los cortes directos realizados en el estudio de Vorsevi.

Indicar por último, que salvo las alusiones a posibles expansividades, y a alguna mala interpretación en los ensayos de hinchamiento o en las deformaciones por compresión, el estudio de Vorsevi es bastante indicativo tanto en la geología de la zona de la Catedral, como en algunas de las posibles causas del deterioro de ésta.

Valor medio de:

- Cohesión en las arcillas: 1.6 t/m².
- Ángulo de rozamiento en arcilla: 22.4°.
- Resistencia a compresión simple en arcillas: 3.16 kp/cm²; si quitamos el valor de 4.5 kp/cm² del sondeo S3 (posiblemente excesivo y erróneo), el valor medio de la $R_{CS} = 2.7$ kp/cm² (más real).
- Clasificación media: CL (arcillas de baja plasticidad).

Resumen de los datos básicos:

Sondeo	Nivel I	Rañas	Arcillas
S-1	0 – 3.3 m		
S-2	0 – 2.2 m	2.2 – 5.5 m	5.5 – 15 m
S-3	0 – 2.3 m	2.3 – 4.3 m	
S-3 A	0 – 1.8 m	1.8 – 6.3 m	6.3 – 15 m
S-4	0 – 2.4 m	2.4 – 5.7 m	
S-5	0 – 2.4 m	2.4 – 9.3 m	9.3 – 14.5 m
S-6	0 – 3.85 m	3.85 – 6 m	6 – 13 m
	Plasticidad muy baja	Plasticidad baja	Plasticidad de media a baja

Tabla 9.- Resumen de datos básicos.

9.2.2.- Trabajo de GMC.-

En 2008 la empresa de Ingeniería GMC y el laboratorio de control de calidad de materiales de construcción, GEOTECAM, realizan un estudio geológico y geotécnico tanto de campo como de laboratorio, con el fin de confirmar los datos obtenidos por Vorsevi y, de esta manera, poder acotar más las posibles causas del deterioro de algunos elementos estructurales de la Catedral, con el fin de plantear también las posibles soluciones que eviten la progresión de dicha ruina.

Se realizan un total de 17 sondeos, 15 de 16 m de profundidad y uno de 30 m, con identificación del material a distintas cotas, SPT (Standard Penetration Test), límites de Atterberg, así como ensayos de compresión simple, cortes directos, hinchamiento, Lambe, porosidad y contenido en carbonato cálcico y en materia orgánica (se adjunta un resumen de los ensayos realizados) (Tabla 10). También se realizan 14 piezómetros, 2 inclinómetros y 1 tomografía eléctrica.

La descripción geológica del terreno de la Catedral, coincide, lógicamente, con la dada por Vorsevi, exceptuando que donde Vorsevi indica arcillas margosas, GMC indica con un mejor criterio y más razonado, que son arcillas en unos casos limo-arenosas y en otros casos de alta compacidad, derivadas de las estructuras paleozoicas.

El promedio de espesor del nivel superior de tierra vegetal, arenas-arcillosas y relleno antrópico es de unos 2 m, y el de terrazas o rañas es de unos 3.65 m, estando por debajo las arcillas. Lo anterior coincide bastante con el estudio de Vorsevi.

El estudio de GMC, clasifica las terrazas o rañas como arcillas de baja plasticidad. En el caso de las arcillas, éstas son clasificadas como arcillas de media a baja plasticidad. Esto cuadra bastante con la geología general de la zona y nuevamente nos indica en principio la no existencia de arcillas expansivas.

Por otra parte, la resistencia media a compresión simple de los finos ensayados tanto en las terrazas como en las arcillas es de 2.34 kp/cm², y el N medio del SPT en las arcillas es superior a 40, lo que supone arcillas de alta compacidad y alta capacidad portante. De las presiones de hinchamiento ensayadas por GMC, solo una está por encima de 1.5

kp/cm². De cualquier manera no llegan a ser preocupante ya que no supera el valor de 2.5 kp/cm², siendo la media de la presión de hinchamiento de 0.54 kp/cm², que es baja y ni siquiera da a entender que pueda haber expansividad. En el caso del % libre de hinchamiento, la media es de 1% que no es indicativa de arcillas expansivas.

El estudio en general, es bastante completo desde un punto de vista de datación geotécnica. Sin embargo, las medias son bastante representativas y no se entiende por qué se dice en el informe que hay riesgo de expansividad. En todo caso, cuando se indica que hay riesgo de algo hay que decir cuál es la probabilidad de que exista ese riesgo, y por supuesto evaluar ese riesgo, por ejemplo como levantamiento-hundimiento. Los valores medios dados por GMC no indican que haya riesgo de expansividad, ni colapso.

Las indicaciones que se dan de tensiones admisibles o asentamientos, son meramente didácticas y no tienen el valor de indicación que tenía el estudio de deslizamientos de Vorsevi.

Resumen de los datos básicos:

Sondeo	Nivel I	Rañas	Arcillas
S – 1	0 – 2.5 m	2.5 – 8.1 m	8.1 – 16 m
S – 2	0 – 3.0 m	3.0 – 5.2 m	5.2 – 16 m
S – 3	0 – 3.8 m	3.8 – 6.2 m	6.2 – 16 m
S – 4	0 – 3.3 m	3.3 – 7.6 m	7.6 – 16.2 m
S – 5	0 – 2.2 m	2.2 – 5.7 m	5.7 – 16 m
S – 6	0 – 0.7 m	0.7 – 3.2 m	0.7 – 16 m
S – 7	0 – 0.9 m	0.9 – 4.5 m	0.9 – 16 m
S – 8	0 – 2.0 m	2.0 – 6.2 m	6.2 – 16 m
S – 9	0 – 2.4 m	2.4 – 7.0 m	7.0 – 16 m
S – 10	0 – 0.2 m	0.2 – 6.2 m	6.2 – 16 m
S – 11	0 – 0.3 m	0.3 – 6.0 m	6.0 – 16 m
S – 13	0 – 1.2 m	1.2 – 3.2 m	3.2 – 16 m
S – 14	0 – 2.8 m	2.8 – 4.0 m	4.0 – 16 m
S – 15	0 – 5.0 m		5.0 – 16 m
S – 16	0 – 2.1 m	2.1 – 7.35 m	7.35 – 30 m
S – 17	0 – 3.0 m		2.8 – 16.5 m
	Plasticidad baja	Plasticidad de media a baja	Plasticidad de media a baja

Tabla 10.- Resumen de datos básicos.

Valor medio de:

- Cohesión en las arcillas: 9.2 t/m².
- Ángulo de rozamiento en arcillas: 23.6°; sin el valor de 43° del sondeo S – 17 que consideramos excesivo y erróneo, el ϕ' medio = 20.3° (más real).
- Resistencia a compresión simple en arcillas: 2.34 kp/cm².
- Clasificación media: CL (arcillas de baja plasticidad).
- Cohesión en los finos de las terrazas: 2.1 t/m²; sin el valor de 5.1 t/m² del sondeo S – 13 la c' media = 0.5 t/m² (más real).
- ϕ' medio de los finos de las terrazas = 24.7° \approx 25°.
- El peso específico aparente de arcillas y finos de terrazas \approx de 1.9 a 2 t/m³.

- Índice de poros en las arcillas $n = 0.33$.

9.3.- Sismología de la zona.-

9.3.1.- Antecedentes históricos.-

La mañana del 1 de noviembre de 1755, Lisboa sufrió un terremoto, que dependiendo de la consulta bibliográfica que se haga, estuvo comprendido entre una magnitud de 7.5 a 8.5 en la escala de Richter o en la de magnitudes del momento. Parece ser que el epicentro pudo estar localizado a unos 300 o 400 km en el Atlántico entre Lisboa y Portimao (sur de Portugal). Hubo más de 60.000 muertos, siendo las provincias de Huelva y Cádiz las más afectadas en España por daños y víctimas.

La mayoría de los muertos se debieron al gran maremoto (tsunami) que dicho terremoto indujo. Parece ser que la altura de la ola máxima estuvo entre 6 y 15 metros. Las consecuencias se propagaron por el Tajo más allá de la provincia de Cáceres. La dirección del terremoto fue suroeste-noroeste, siguiendo más o menos la falla Plasencia-Jerte.

Las únicas crónicas que en Extremadura hacen referencia a este terremoto, se refieren al derrumbe de la techumbre y plementería de una parte de la Catedral de Coria y un cierto desvío del Alagón a su paso por la zona sur de la Catedral.

9.3.2.- Identificación de la Acción Sísmica.-

El objetivo de este apartado es estimar la posible acción sísmica capaz de producir efectos negativos en la zona de la Catedral de Coria y, en caso de ser así, indicar las diferentes actuaciones para identificar la acción sísmica correspondiente, valorarla e indicar también las recomendaciones pertinentes para su protección.

Para definir la evaluación de la acción sísmica se va a seguir el documento *NCSE-02*, Norma de Construcción Sismorresistente Española para Edificación del MFOM.

En dicha normativa, independientemente del software y procedimientos numéricos que se pueda aplicar, uno de los métodos propuestos para el cálculo de estructuras de edificación es el método de masas concentradas y sus modos de deformación o grados de libertad, es decir, mediante el “*cálculo modas espectral*”. Para ello, es necesario conocer tanto el espectro de respuesta elástica del terreno de cimentación de la estructura de la Catedral ($S_a(T)$), como la máxima aceleración de cálculo (a_c) para un periodo de retorno determinado. En el caso de considerar los elementos estructurales como sólidos rígidos (muros, taludes) para verificar estados límites de mecánica de suelos, se podrán realizar cálculos pseudoestáticos, introduciendo el efecto de la acción sísmica y las inercias de ella derivadas, con los coeficientes numéricos k_h y k_v de la aceleración de cálculo (NCSE, 2002).

a) Clasificación sísmica de la catedral como una estructura de edificación.

Según el artículo 1.2.2. de la normativa *NCSE-02*, la Catedral se clasifica como una construcción de “*importancia especial*”, porque entra dentro de la siguiente definición: “*las construcciones catalogadas como monumentos históricos o artísticos, o bien de*

interés cultural o similar, por los órganos competentes de las Administraciones Públicas” (NCSE, 2002).

Para aplicar la Norma a este tipo de edificaciones, la aceleración sísmica básica a_b tiene que ser igual o superior a $0,04g$, siendo g la aceleración de la gravedad. De esta forma se deberá tener en cuenta los posibles efectos del sismo en el terreno (artículo 1.2.3. NCSE-02).

b) Aceleración sísmica de cálculo.

En el artículo 2.2 de la Norma, la aceleración sísmica de cálculo, a_c , se define como el producto:

$$a_c = S \cdot \rho \cdot a_b$$

Siendo:

a_b : aceleración sísmica básica (Figura 42).

ρ : coeficiente adimensional de riesgo, función de la probabilidad aceptable de que se exceda a_c , en el periodo de vida para el que se proyecta la construcción. Toma los siguientes valores:

Construcciones de importancia normal $\rho = 1.0$.

Construcciones de importancia especial $\rho = 1.3$.

S : Coeficiente de amplificación del terreno. Toma el valor:

$$\text{Para } \rho \cdot a_b \leq 0.1 g \quad S = \frac{C}{1.25}$$

$$\text{Para } 0.1 g < \rho \cdot a_b < 0.4 g \quad S = \frac{C}{1.25} + 3.33 \cdot \left(\rho \cdot \frac{a_b}{g} - 0.1 \right) \cdot \left(1 - \frac{C}{1.25} \right)$$

$$\text{Para } 0.4 g \leq \rho \cdot a_b \quad S = 1.0$$

Siendo C el Coeficiente de terreno. Depende de las características geotécnicas del terreno de cimentación.

Para la Catedral, en base a la clasificación del tipo de construcción el coeficiente adimensional de riesgo es $\rho = 1.3$. Tal y como se puede ver en la figura 40, está ubicada la zona de estudio de la Catedral y caracterización del terreno, con el fin de determinar la aceleración básica a_b y el coeficiente de contribución K . Según el mapa de peligrosidad, Coria tiene una aceleración básica $a_b = 0.04g$ y un factor de contribución $K = 1.1$.

El terreno de cimentación y de la ladera donde se localiza la Catedral es sedimentario, compuesto en su zona superior por una terraza y en su zona inferior y profunda por arcillas limo-arenosas terciarias. Sabido esto, observando el apartado 2.4. de la Norma, se puede clasificar el terreno como “tipo III”: *suelo granular de compacidad media, o suelo cohesivo de consistencia firme a muy firme; velocidad de propagación de las ondas elásticas transversales o de cizalla de $400 \text{ m/s} \geq v_s > 200 \text{ m/s}$* . Por lo tanto, el coeficiente de clasificación del terreno es en este caso $C = 1.6$.

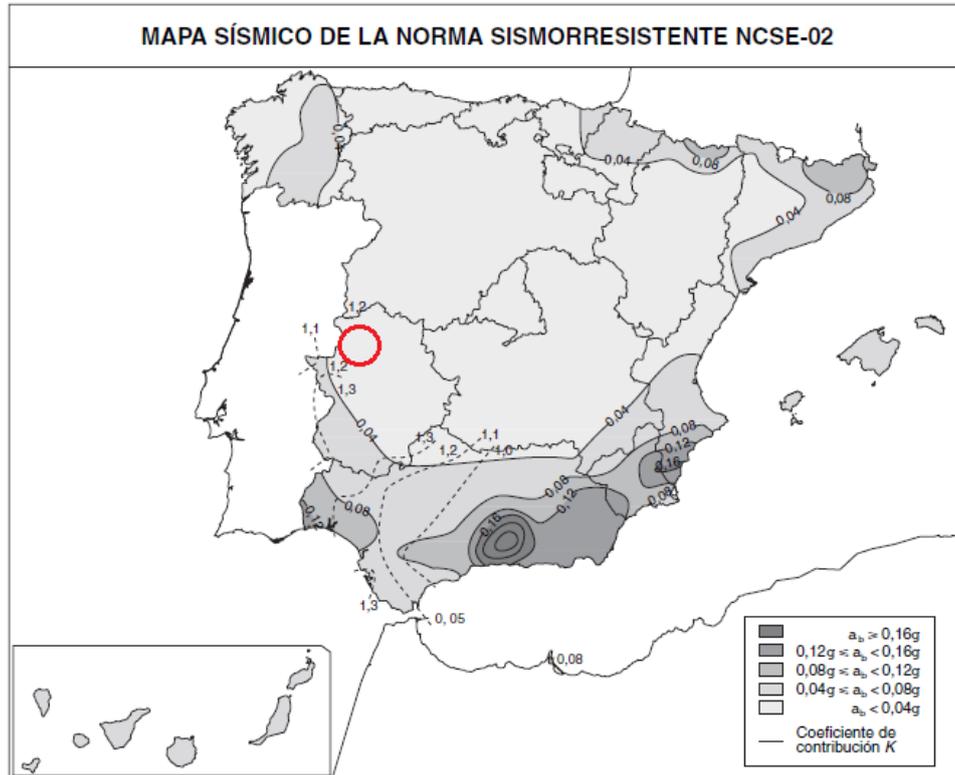


Figura 40.- Mapa de Peligrosidad Sísmica (NCSE, 2002).

Como en este caso $\rho \cdot a_b \leq 0.1 g$, valiendo $\rho \cdot a_b = 0.052 g$, entonces:

$$S = \frac{C}{1.25} = \frac{1.6}{1.25} = \mathbf{1.28}$$

Luego con lo anterior se puede definir la aceleración de cálculo:

$$a_c = 1.28 \cdot 0.052g = \mathbf{0.067g}$$

Con los valores obtenidos de la aceleración de cálculo se obtienen los valores de los coeficientes pseudoestáticos de aceleración horizontal y vertical de cálculo k_h y k_v :

$$k_h = \frac{a_c}{g} = \mathbf{0.067} \quad k_v = \frac{a_v}{g} = \frac{k_h}{2} = \mathbf{0.033}$$

c) Espectro de respuesta elástica.

Un espectro de respuesta elástica, es un valor que se usa en los cálculos de sismicidad, midiendo la reacción de una estructura ante la vibración del suelo que la soporta. El espectro de respuesta elástica es el más habitual en los cálculos sísmicos, nos da una relación con la aceleración sísmica.

Dado que se va a estudiar la estabilidad del talud bajo la Catedral, se necesita saber el espectro de respuesta de esta estructura ante una posible transferencia de vibración del terreno bajo ella. En un sistema completamente rígido, la vibración de la estructura sería la misma que la de su base (la transmitida por el terreno), sin embargo, las estructuras

tienen siempre una cierta elasticidad, la vibración no es la misma y tanto el periodo de vibración como las aceleraciones de base y estructura son diferentes.

Para las componentes horizontales de la acción sísmica y según el artículo 2.3 de la NCSE-02, el espectro de respuesta elástica normalizado de aceleraciones $a(T)$ sería:

$$\begin{aligned} \text{Si } T < T_A & \quad \alpha(T) = 1 + 1.5 \cdot T/T_A \\ \text{Si } T_A \leq T \leq T_B & \quad \alpha(T) = 2.5 \\ \text{Si } T > T_B & \quad \alpha(T) = K \cdot C/T \end{aligned}$$

Siendo:

$\alpha(T)$: valor del espectro normalizado de respuesta elástica.

T : período propio del oscilador en segundos.

K : coeficiente de contribución.

C : coeficiente del terreno, que tiene en cuenta las características geotécnicas del terreno de cimentación (artículo 2.4.).

T_A y T_B son períodos característicos del espectro de respuesta, de valores:

$$\begin{aligned} T_A &= K \cdot C/10 \\ T_B &= K \cdot C/2.5 \end{aligned}$$

En este caso, como está indicado anteriormente, con $C = 1.6$ y $K = 1.1$ obtenemos:

$$T_A = 0.176 \text{ s} \quad T_B = 0.704 \text{ s}$$

Con todos los valores anteriores para el sismo último ya se puede dibujar el espectro normalizado (dividido por a_c) de respuesta elástica (Figura 41):

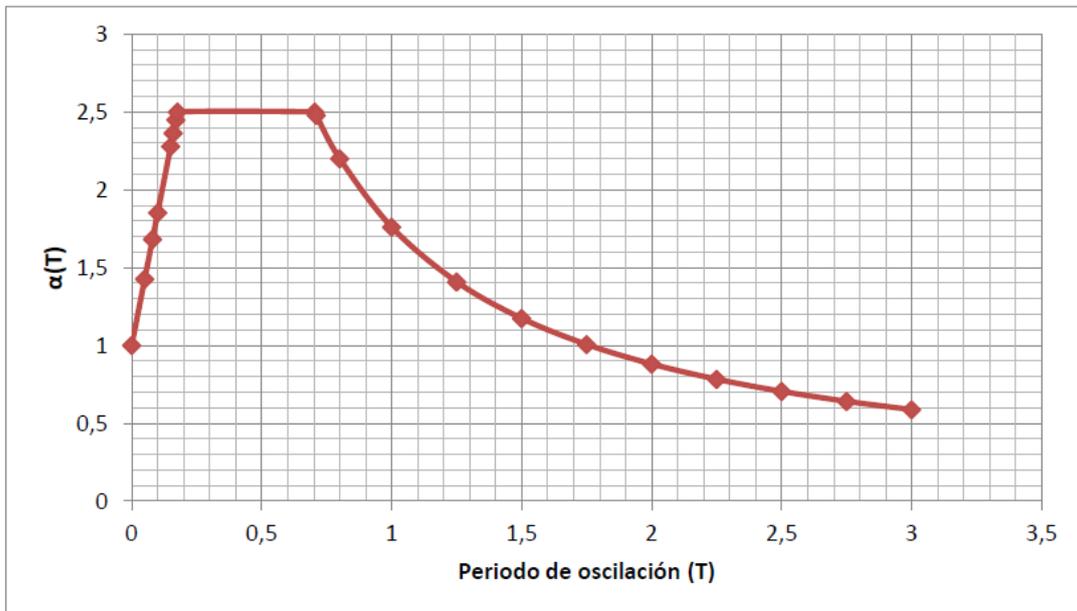


Figura 41.- Espectro de respuesta elástica.

9.3.3.- Cálculo sismorresistente.-

El objeto del cálculo sismorresistente es verificar la seguridad de las construcciones ante las acciones sísmicas que puedan actuar sobre ellas durante su periodo de vida útil.

La norma NCSE-02 establece el análisis de la estructura mediante espectros de respuesta como método de referencia para el cálculo sismorresistente (apartado 3.6.2. de la Norma). También se permite el estudio dinámico de integración de registros de aceleración (apartado 3.6.1. de la Norma) (NCSE, 2002).

La Norma también desarrolla además un método simplificado de cálculo para los casos más usuales de edificación, cuya aplicación se autoriza para los edificios que cumplan las condiciones del apartado 3.5.1 de la Norma. Debe utilizarse un modelo suficientemente representativo de la distribución real de rigideces y masas.

Las condiciones para aplicar el método simplificado de cálculo son los siguientes (3.5.1. NCSE-02) (NCSE, 2002):

1. El número de plantas sobre rasante es inferior a veinte.
2. La altura del edificio sobre rasante es inferior a setenta metros.
3. Existe regularidad geométrica en planta y en alzado, sin entrantes ni salientes importantes.
4. Dispone de soportes continuos hasta cimentación, uniformemente distribuidos en planta y sin cambios bruscos en su rigidez.
5. Dispone de regularidad mecánica en la distribución de rigideces, resistencias y masas, de modo que los centros de gravedad y de torsión de todas las plantas estén situados, aproximadamente, en la misma vertical.
6. La excentricidad del centro de las masas que intervienen en el cálculo sísmico respecto al de torsión es inferior al 10% de la dimensión en planta del edificio en cada una de las direcciones principales.

Cumpliendo esto, se puede aplicar el método simplificado.

Método simplificado de cálculo para los casos más usuales de edificación

Dado que la Catedral reúne los requisitos establecidos anteriormente, se podrá asimilar a un modelo unidimensional constituido por un oscilador múltiple con un solo grado de libertad de desplazamiento en planta. Su análisis se realiza, en este método simplificado, a partir de un sistema de fuerzas horizontales equivalente al de los terremotos.

El periodo fundamental de una estructura es el tiempo requerido para completar un ciclo completo, cuando ésta experimenta una vibración no forzada. El conocimiento de este dato es muy importante, porque de él depende la magnitud de la fuerza sísmica que experimentará la estructura.

Aplicando lo dicho en el artículo 3.7.2 de la NCSE-02 y si se considera la dirección pésima del cálculo la norte-sur (dado que el talud esta al sur de la Catedral), se tendría como valor medio de L unos 19 m y como valor de H (teniendo en cuenta la cumbre de nave central y sin considerar la torre) unos 29 m. El edificio se clasifica dentro del

grupo de *edificios con muros de fábrica de ladrillo o bloques*, por lo que el periodo fundamental T_F , en segundos, puede estimarse de forma aproximada mediante la siguiente expresión:

$$T_F = 0.06 \sqrt{H/(2L + H)} / \sqrt{L}$$

Siendo:

H : Altura de la edificación, sobre rasante, en metros.

L : Dimensión en planta de la edificación, en el sentido de la oscilación, en metros.

De esta forma:

$$T_F = 0.173 \text{ s}$$

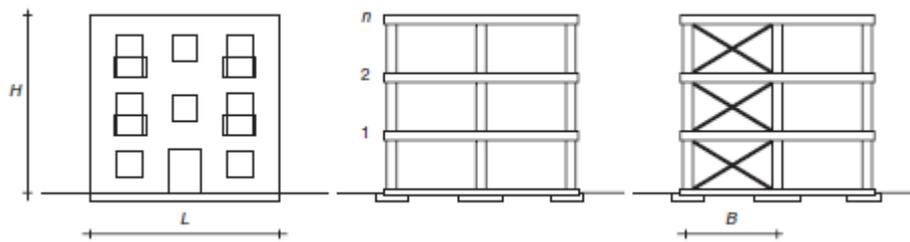


Figura 42.- Diferentes tipos de estructuras (artículo 3.7.2.2. NCSE-02).

Las estructuras, al igual que todos los cuerpos materiales, poseen distintas formas de vibrar ante la acción de cargas dinámicas que, en el caso de una acción sísmica, pueden afectarla en mayor o menor medida. Estas formas de vibrar es lo que conocemos como modos de vibración.

Los modos a considerar en función del período fundamental de la construcción, T_F , serán los siguientes:

1. El primer modo, si $T_F \leq 0.75 \text{ s}$.
2. El primer y segundo modos, si $0.75 \text{ s} < T_F \leq 1.25 \text{ s}$.
3. Los tres primeros modos, si $T_F > 1.25 \text{ s}$.

Dado que en este caso $T_F = 0.173 \text{ s}$, solo sería necesario considerar el primer modo fundamental de la estructura.

9.3.4.- Consideraciones finales.-

Según la aceleración básica de la zona, se puede calcular el deslizamiento del talud mediante un método pseudoestático añadiendo a los empujes horizontales el efecto sísmico (k_h) horizontal.

Respecto de un posible riesgo de licuefacción, si se opera según el artículo C.4.3.1 de la Norma, este estudio se puede hacer mediante la comparación de la tensión tangencial horizontal equivalente del terreno, τ_E , con la resistencia del terreno a licuación, R_L , para lo que podrán utilizarse los procedimientos establecidos en la práctica de la ingeniería geotécnica sísmica o el siguiente procedimiento simplificado basado en el ensayo SPT, válido para terrenos de superficie horizontal y que se aplicara a todas las capas licuables

situadas en la profundidad definida de suficiente seguridad ante la licuación si, a todas las profundidades se verifica que:

$$\tau_E \leq \frac{R_L}{1.5}$$

siendo τ_E la tensión tangencial equivalente al terremoto, que podrá suponerse igual a:

$$\tau_E = 0.65 r_d \cdot \sigma_V \cdot (a_c/g)$$

donde:

$$r_d = 1 - 0.015z$$

siendo:

z : la profundidad en metros.

σ_V : es la tensión total vertical sobre el plano horizontal, variable con la profundidad z , a la que se comprueba la licuación.

a_c : es la aceleración sísmica de cálculo (calculada anteriormente).

g : es la aceleración de la gravedad.

En este caso, teniendo un peso específico aparente de 2.22 t/m^3 para las terrazas y una profundidad media bajo cimientos de 3 m, se tiene que:

$$r_d = 1 - 0.015 \cdot 3 = 0.955$$

$$\tau_E = 0.65 \cdot 0.955 \cdot (2.22 \cdot 3) \cdot (0.067 \text{ g/g}) = 0.27 \text{ t/m}^2$$

Y siendo R_L la resistencia del terreno a licuación, que puede obtenerse mediante la expresión:

$$R_L = K_M \cdot R_I \cdot \sigma'_V$$

donde:

$$K_M = 1.5 - 1.8(K - 1)^{1/2}$$

K_M : es el coeficiente de contribución definido el apartado.

R_I : se lee en la figura 43. En función del golpeo en el ensayo SPT normalizado, para una energía útil del 60% de la nominal y una presión efectiva vertical de 100 kPa (1 kp/cm^2) ($N_{1.60}$), de valor:

$$N_{1.60} = N \cdot (E_R/60) \cdot (1/\sigma'_V)^{1/2}$$

E_R : es el porcentaje de la energía de los golpes en el ensayo SPT que llega realmente al terreno.

σ'_V : es la tensión efectiva vertical, en kp/cm^2 , sobre un plano horizontal, a la profundidad z .

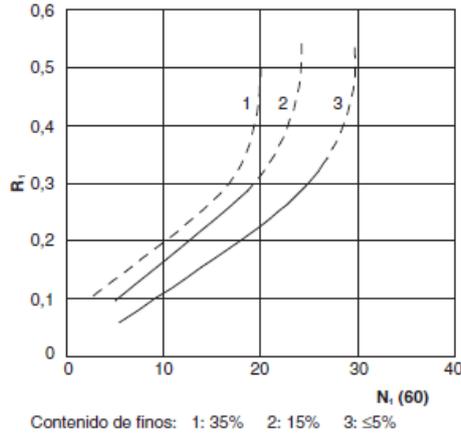


Figura 43.- Relación entre el cociente de tensiones que causa la licuación en arenas limpias y arenas limosas y el golpeo corregido en el SPT, $N_{1,60}$ (artículo C.4.3.1. NCSE-02).

En nuestro caso, a falta de más datos o desconocimiento del estado de los mismos, y dado que los valores obtenidos en el estudio de Vorsevi son más adecuados que los de GMC, vamos a considerar que los datos del ensayo SPT del estudio de Vorsevi están ya corregidos, es decir, que son directamente el $N_{1,60}$. De modo que tenemos:

Muestra	Profundidad (m)	N_{spt}
S2	1.50	19
S3	3.30	49 - R
S5	2.20	24

Tabla 11.- Valores de los ensayos SPT de Vorsevi.

Como podemos ver, el ensayo realizado en el sondeo S3 es rechazado. Normalmente un ensayo SPT es rechazado cuando tiene valores superiores a 50, dado que en este caso el valor es límite y muy diferenciado de los otros dos, es rechazado para los cálculos.

Con los resultados obtenidos de los sondeos S2 y S5 entramos en la gráfica para obtener los valores de R_l . Dado que consideramos un valor medio de los finos, en torno al 10% y en la gráfica no hay curva de ese valor, tenemos que interpolar para obtener los resultados adecuados. A continuación se muestran los cálculos realizados para la obtención de los mismos:

Sondeo S2:

$$\begin{array}{l}
 5\% \longrightarrow R_l = 0.225 \\
 10\% \longrightarrow R_l = x \\
 15\% \longrightarrow R_l = 0.31
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} 5\% \\ 10\% \\ 15\% \end{array}} \right\}
 \begin{array}{l}
 15\% - 5\% = 10\% \\
 10\% - 5\% = 5\% \\
 0.31 - 0.225 = 0.085
 \end{array}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{5\%}{10\%} &= 0.5 \\
 0.085 \cdot 0.5 &= 0.0425 \\
 \underline{R_l = x} &= 0.31 - 0.0425 = \underline{0.2675}
 \end{aligned}$$

- Sondeo S5:

$$\begin{array}{l}
 5\% \longrightarrow R_I = 0.29 \\
 10\% \longrightarrow R_I = x \\
 15\% \longrightarrow R_I = 0.5
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} 5\% \\ 10\% \\ 15\% \end{array}} \right\}
 \begin{array}{l}
 15\% - 5\% = 10\% \\
 10\% - 5\% = 5\% \\
 0.5 - 0.29 = 0.21
 \end{array}$$

$$\frac{5\%}{10\%} = 0.5$$

$$0.21 \cdot 0.5 = 0.105$$

$$R_I = x = 0.5 - 0.105 = \underline{0.395}$$

Una vez conocido el parámetro R_I se procede a comprobar el riesgo a licuefacción. Para ello se usan las expresiones citadas anteriormente.

Dado que se ha tomado una profundidad media bajo cimientos de 3 m y un peso específico aparente de 2.22 t/m^3 para calcular el riesgo de licuefacción, las tensiones a esa profundidad son:

$$\sigma_V = \gamma_{\text{apa}} \cdot z = 2.22 \text{ t/m}^3 \cdot 3 \text{ m} = 6.66 \text{ t/m}^2$$

$$U = \gamma_w \cdot z = 1 \text{ t/m}^3 \cdot 3 \text{ m} = 3 \text{ t/m}^2$$

$$\sigma'_V = \sigma_V - U = 6.66 \text{ t/m}^2 - 3 \text{ t/m}^2 = 3.66 \text{ t/m}^2$$

Una vez obtenido el valor de la tensión vertical efectiva a la cota a la que se va a comprobar la licuefacción, se comprueba si existe o no el riesgo de licuefacción a dicha cota. Sabiendo que $K = 1.1$, se tiene que K_M tiene el siguiente valor:

$$K_M = 1.5 - 1.8 (K - 1)^{1/2} = 1.5 - 1.8 (1.1 - 1)^{1/2} = \mathbf{0.931}$$

Sondeo S2:

$$R_L = K_M \cdot R_I \cdot \sigma'_V = 0.931 \cdot 0.2675 \cdot 3.66 \text{ t/m}^2 = \mathbf{0.91 \text{ t/m}^2}$$

$$\tau_E \leq \frac{R_L}{1.5} \longrightarrow \left. \begin{array}{l} \tau_E \leq \frac{0.91}{1.5} = 0.61 \text{ t/m}^2 \\ \tau_E = 0.27 \text{ t/m}^2 \end{array} \right\} \underline{0.27 \text{ t/m}^2 < 0.61 \text{ t/m}^2}$$

Sondeo S5:

$$R_L = K_M \cdot R_I \cdot \sigma'_V = 0.931 \cdot 0.395 \cdot 3.66 \text{ t/m}^2 = \mathbf{1.35 \text{ t/m}^2}$$

$$\tau_E \leq \frac{R_L}{1.5} \longrightarrow \left. \begin{array}{l} \tau_E \leq \frac{1.35}{1.5} = 0.9 \text{ t/m}^2 \\ \tau_E = 0.27 \text{ t/m}^2 \end{array} \right\} \underline{0.27 \text{ t/m}^2 < 0.9 \text{ t/m}^2}$$



Figura 45.- Situación de la Catedral junto al talud bajo estudio.

La proximidad de la Catedral al borde de la cabeza del talud de la ladera sur que define el contorno de dicho cerro, puede ser a priori una causa directa de afección al propio monumento, bien porque la ladera de por sí sola sea casi inestable bien por la inestabilidad que a esta le provoca la carga de la Catedral sobre ella.

A partir de una cartografía a escala 1:1000 obtenida del ayuntamiento de Coria, se han realizado diferentes perfiles de ladera para ver tanto la inclinación de esta como la situación de la Catedral en dichos perfiles (Figura 46).

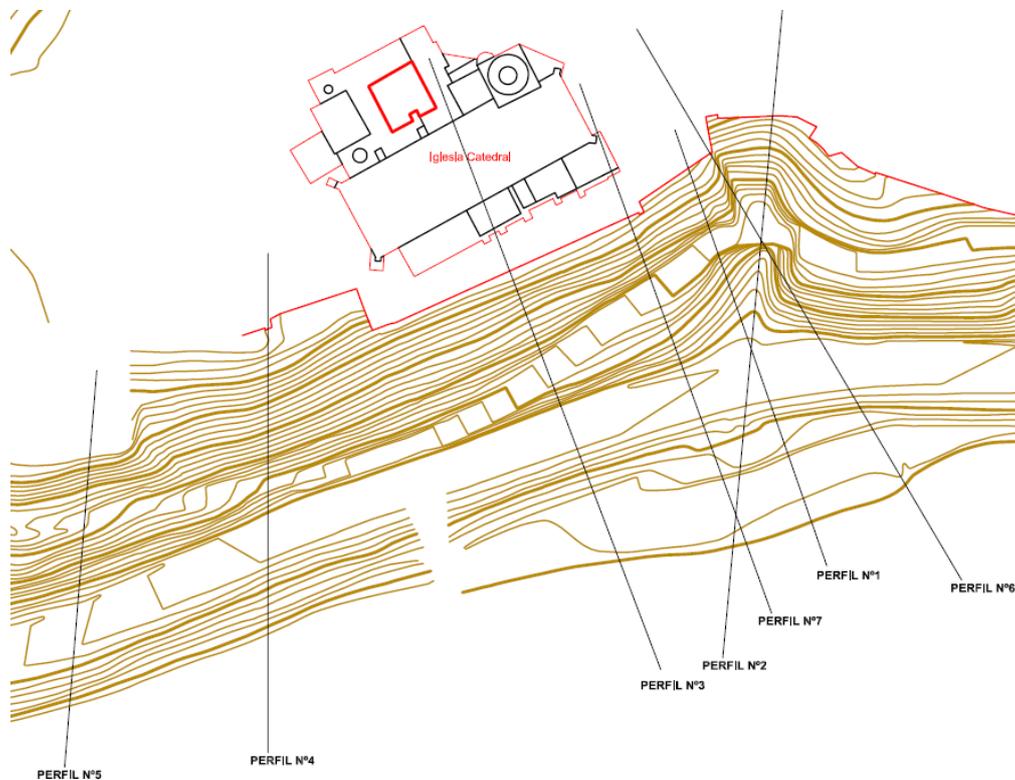


Figura 46.- Plano de la situación de los distintos perfiles.

Del estudio de estos perfiles los más representativos y útiles para el desarrollo del estudio son los números 4, 3 y 7 los que representan mejor la situación real de la ladera y la vega, además de presentar la mayor pendiente, parámetro entre otros, que se relaciona directamente con la inestabilidad.

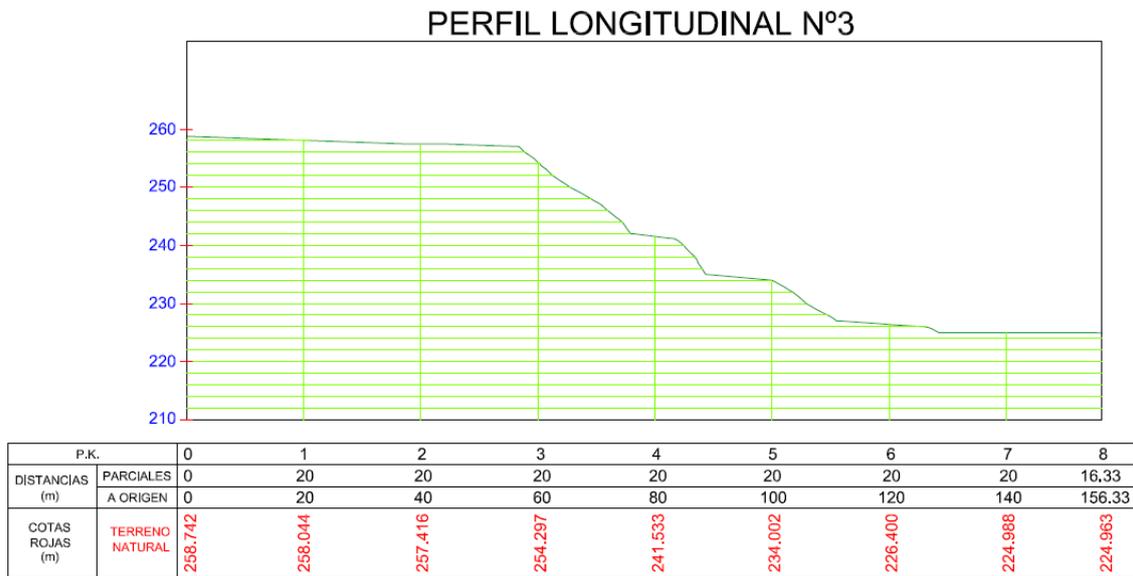


Figura 47.- Perfil longitudinal n° 3.

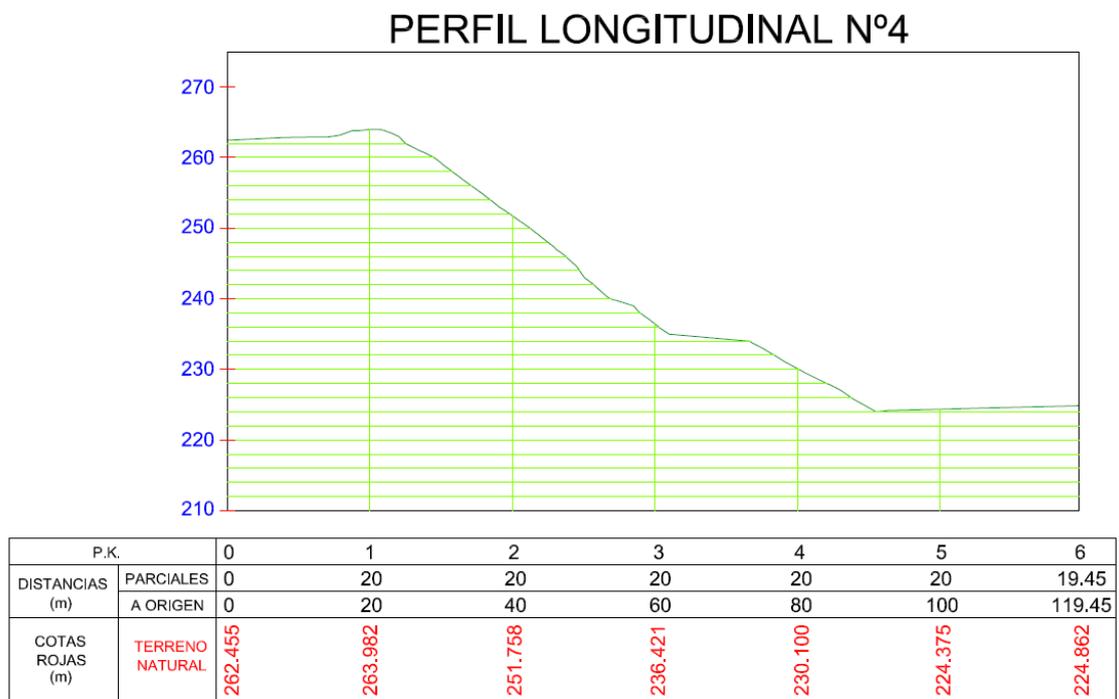


Figura 48.- Perfil longitudinal n° 4.

PERFIL LONGITUDINAL N°7

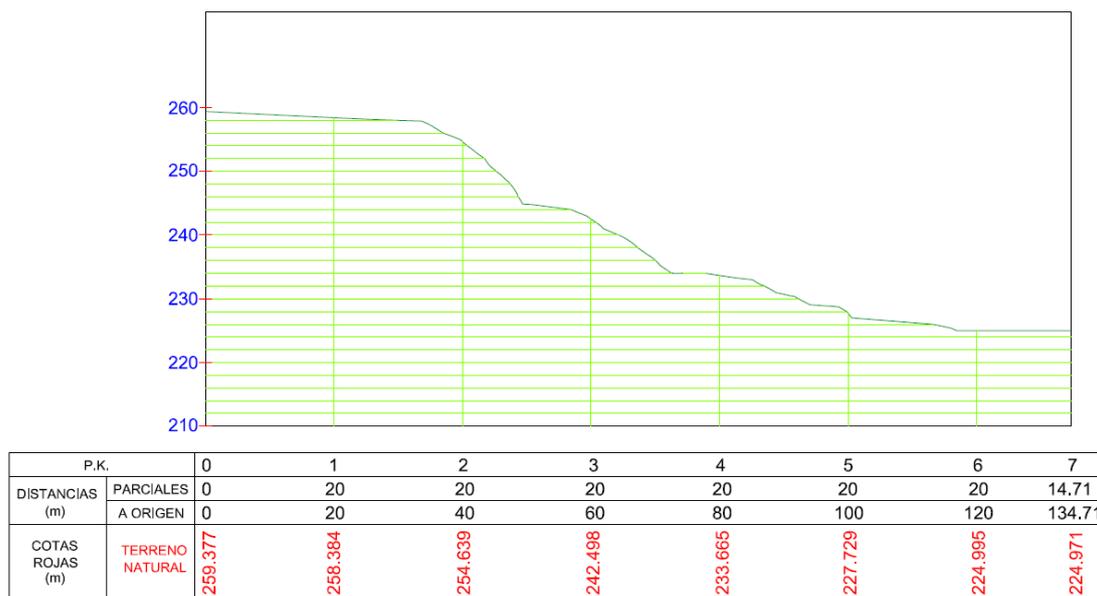


Figura 49.- Perfil longitudinal n° 7.

Estos perfiles dan como resultado una sección maciza (Figura 49), una sección solo de pilas y ligeramente más alejada del borde del talud (Figura 47) y una sección sin catedral (Figura 48). Hay que tener en cuenta que en general son perfiles entre 30 y 40 m de altura con ángulos medios de pendiente, medidos desde la horizontal, de 35° a 45° y que en su mayor parte están compuestos por arcillas limo-arenosas.

Se introducen en el programa Geo-Studio los datos geotécnicos del terreno así como las condiciones de cálculo. Se utiliza una metodología de rebanadas infinitas y se comprobarán los distintos cálculos para el método de Morgenstern y Price, Bishop Clásico y Janbu.

Los perfiles se someterán a estudio en diferentes situaciones. Si alguna de estas situaciones tiene un coeficiente de seguridad al deslizamiento comprendido entre 0.95 y 1.05 será factible que la porción comprometida del talud pueda deslizarse, y por lo tanto de producir movimientos en la base del cimiento, susceptibles de causar efectos no deseados de la Catedral. Por el contrario, coeficientes de seguridad superiores a 1.2, en teoría, no deberían inducir en el cimiento a movimientos que pudiesen causar efectos no deseados en la Catedral.

Esta metodología de cálculo sigue las leyes descritas en el Marco Teórico (capítulo 5), referentes a la teoría de estabilidad de taludes.

9.4.2.- Estudio del perfil n° 7.-

Primero se obtiene la representación gráfica del perfil, el número 7 en este caso, incluyendo la sección de la Catedral correspondiente. En el gráfico aparecen representadas las arcillas limo-arenosas en color amarillo, en marrón las terrazas (en azul si están saturadas), en verde la tierra vegetal y el relleno entrópico y en gris la parte del muro este y el talud de la carretera vieja (Figura 50).

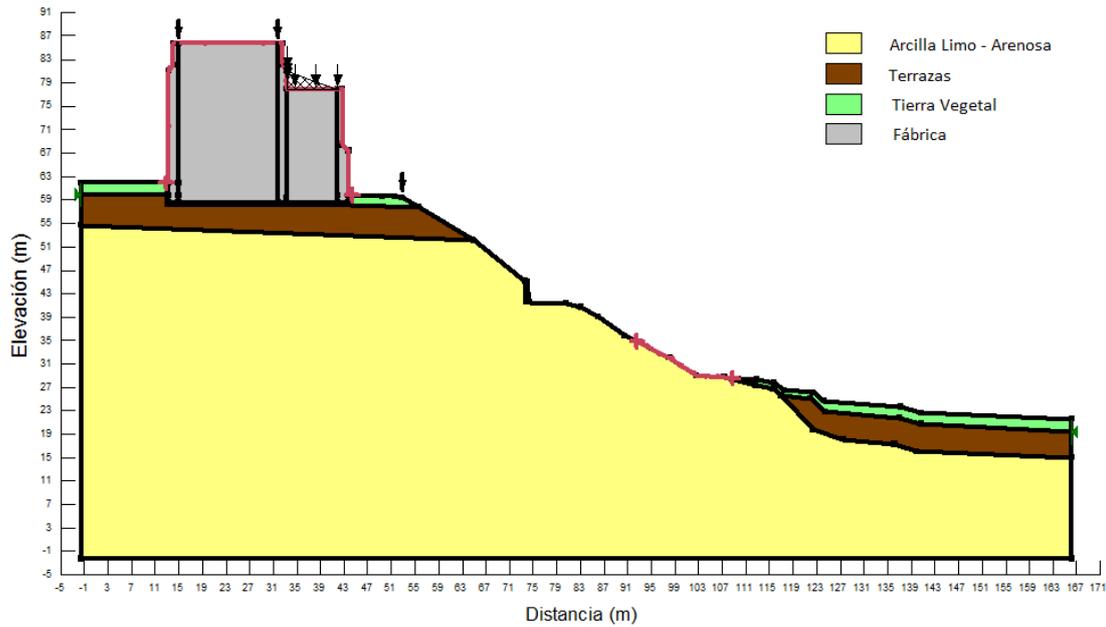


Figura 50.- Perfil n° 7 en Geo-Studio.

Cargas introducidas

Para los cálculos de las diferentes situaciones a estudio, se ha hecho coincidir la dirección de dicho perfil con el muro este de la Catedral. De esta forma, se tiene una solitud de carga mayor que la real sobre el talud en este perfil. Se podría decir con esto, que si el talud es estable con esta situación, lo será aún más en la situación real, al tener menor solitud de carga.

Además del peso propio de la sección de la Catedral, existe el efecto de las cargas que la bóveda transmite al muro este; encima del archivo superior a la sacristía también se pone el efecto de la bóveda y el tejado, y en el borde del talud se dispone el efecto del muro con la abalaustrada (Figura 51).

a) Carga transmitida por la bóveda.

Para calcular la carga vertical transmitida por la bóveda al muro se ha considerado una carga transmitida a cada lado del muro de $P \cdot L$, con un espesor de bóveda de 50 cm, un peso específico de fábrica de 26.6 kN/m^3 y 8.66 m como la mitad del arco. El espesor considerado para este cálculo es superior al real, pero de esta forma se está sometiendo a una situación más extrema de cálculo al talud y estar más del lado de la seguridad. De modo que quedaría:

$$P \cdot L = 26.6 \text{ KN/m}^3 \cdot \pi \cdot 0.5 \text{ m} \cdot 8.66 \text{ m} \approx 362 \text{ KN/m}$$

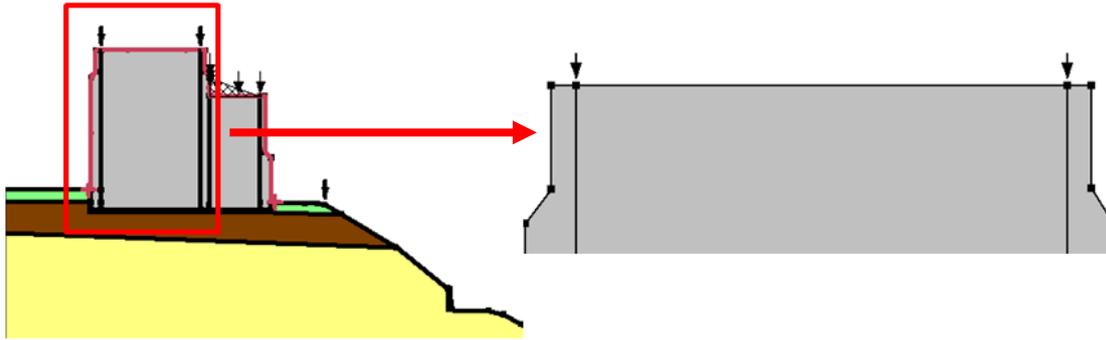


Figura 51.- Cargas transmitidas por la bóveda.

La carga horizontal transmitida por la bóveda es absorbida por el contrafuerte.

b) Carga transmitida sobre el muro de la sacristía.

Sobre la parte superior de la sacristía hay que considerar la aplicación de la carga transmitida por la bóveda y el tejado. En este caso se trata de una carga triangular, transmitida por el recerido del muro de la sacristía que sostiene el tejado y la bóveda de la sacristía. Se considera una densidad de fábrica de unos 6.4 kN/m^3 , con una anchura de la carga de 5.78 m y una altura en su extremo izquierdo de 2.5 m (Figura 52).

$$qt = \frac{1}{2} \cdot 5.78 \cdot 2.5 \cdot 6.4 \cdot 0.25 = 11.56 \text{ KN}$$

$$qt = \frac{11.56}{5.78} = 2 \text{ KN}$$

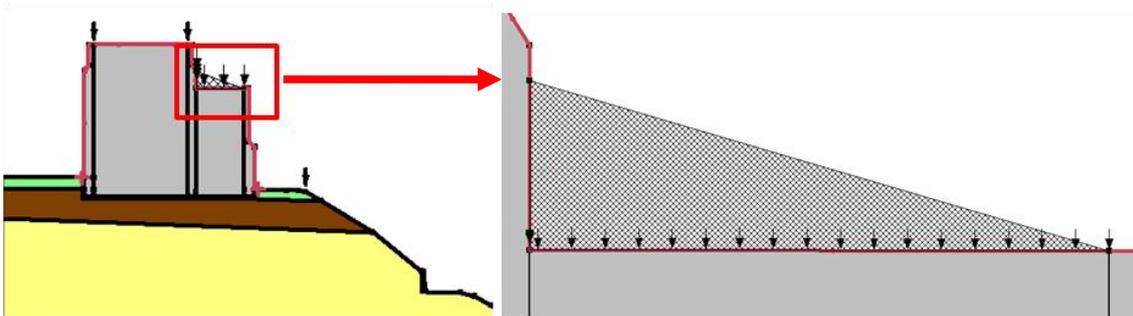


Figura 52.- Distribución de la carga sobre el muro de la sacristía.

c) Carga puntual sobre la corona del talud.

Al final de la explanación sobre la que se encuentra situada la Catedral, se encuentra una abalaustrada de fábrica de aproximadamente unos 1.2 metros de altura (considerando la parte de ella que este bajo tierra), produciendo una carga puntual en la corona del talud. A efectos de cálculo se considera un peso específico de fábrica de 26.6 kN/m^3 , con lo que la carga será (Figura 53):

$$q = 1.2 \text{ m} \cdot 0.25 \text{ m} \cdot 26.6 \text{ KN/m}^3 = 8 \text{ KN/m}$$

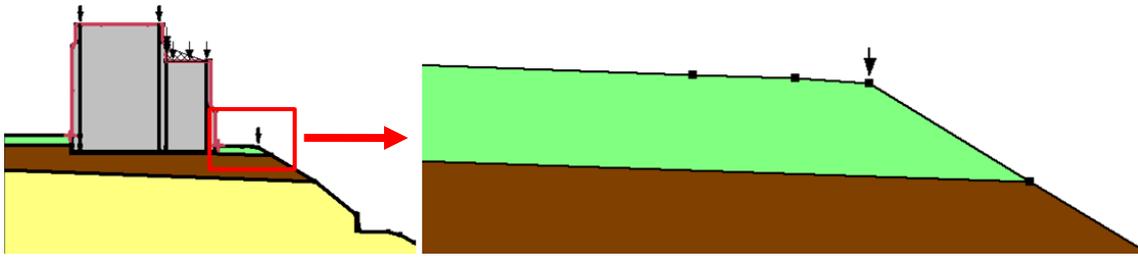


Figura 53.- Carga producida por la abalaustrada.

Hipótesis planteadas

Los cálculos de estabilidad al deslizamiento se han calculado en diferentes situaciones, teniendo en cuenta los coeficientes sísmicos (k_h y k_v) y una posible saturación de las terrazas. A continuación se dan los gráficos correspondientes a las distintas hipótesis utilizadas:

- Sin capa freática y sin sismo (Figuras 54, 55 y 56).
- Con las terrazas saturadas y sin sismo (Figuras 57, 58 y 59).
- Sin capa freática y con sismo (Figuras 60, 61 y 62).
- Con las terrazas saturadas y con sismo (Figuras 63, 64 y 65).

En el primer gráfico aparece la superficie de deslizamiento crítica con su factor de seguridad correspondiente a cada hipótesis (Figuras 54, 57, 60 y 63). En un segundo gráfico se muestran las rebanadas usadas para el cálculo de la superficie de deslizamiento (Figuras 55, 58, 61 y 64).

Como tercer y último gráfico se presenta el mapa de seguridad (Figuras 56, 59, 62 y 65). Este mapa de seguridad es una forma eficaz de ver gráficamente un resumen de las superficies de deslizamiento del ensayo. Todas las superficies de prueba de deslizamiento válidas se agrupan en bandas con el mismo factor de seguridad. Las bandas están pintadas con colores diferentes, desde el factor de seguridad más alto hasta la banda correspondiente con el factor de seguridad más bajo. En este caso, al estar todos los resultados muy próximos entre sí, solo aparecen pintadas de color rojo. La línea blanca representa la superficie de deslizamiento crítica.

Este tipo de representación muestra claramente la ubicación de la superficie de deslizamiento crítica con respecto a todas las superficies de deslizamiento de prueba. También muestra la zona de las superficies potenciales de deslizamiento dentro de un rango de factor de seguridad.

1) A1.- Hipótesis sin capa freática y sin sismo.

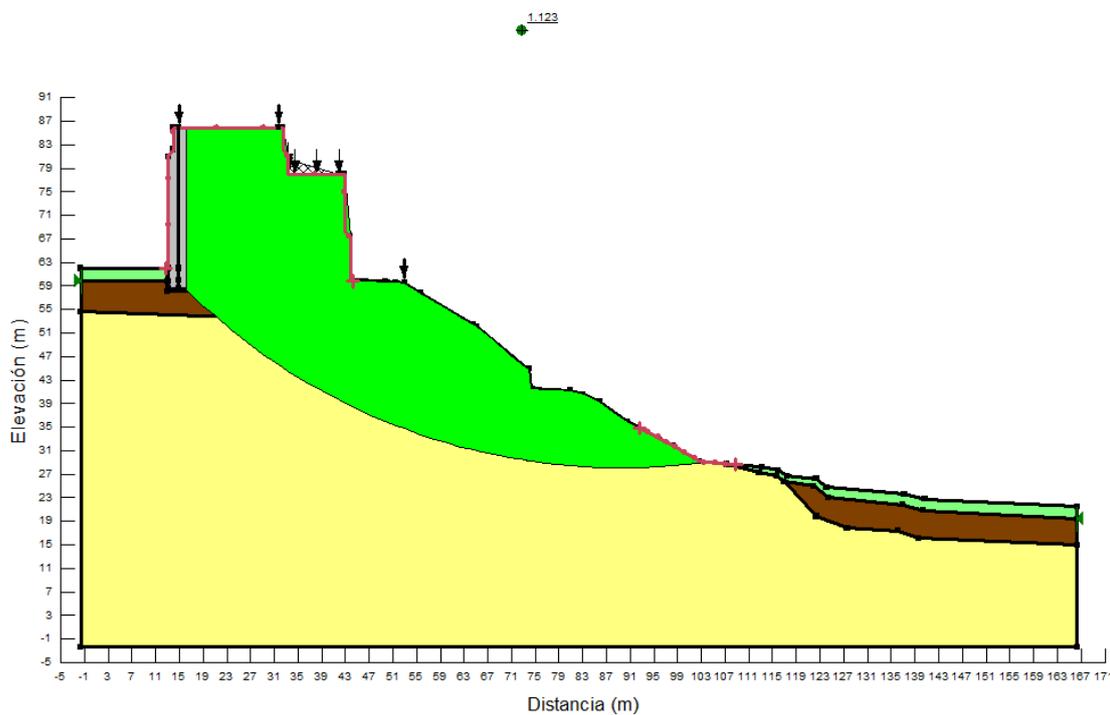


Figura 54.- Superficie de deslizamiento para un F.S.=1.123.

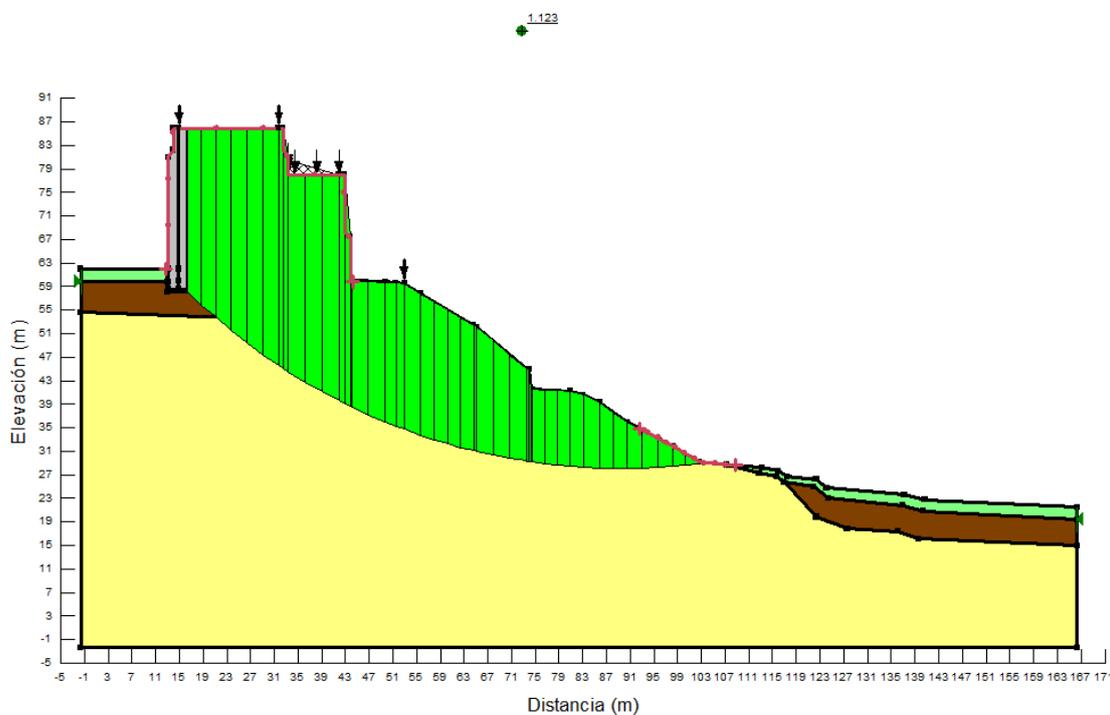


Figura 55.- Rebanadas de la superficie de deslizamiento.

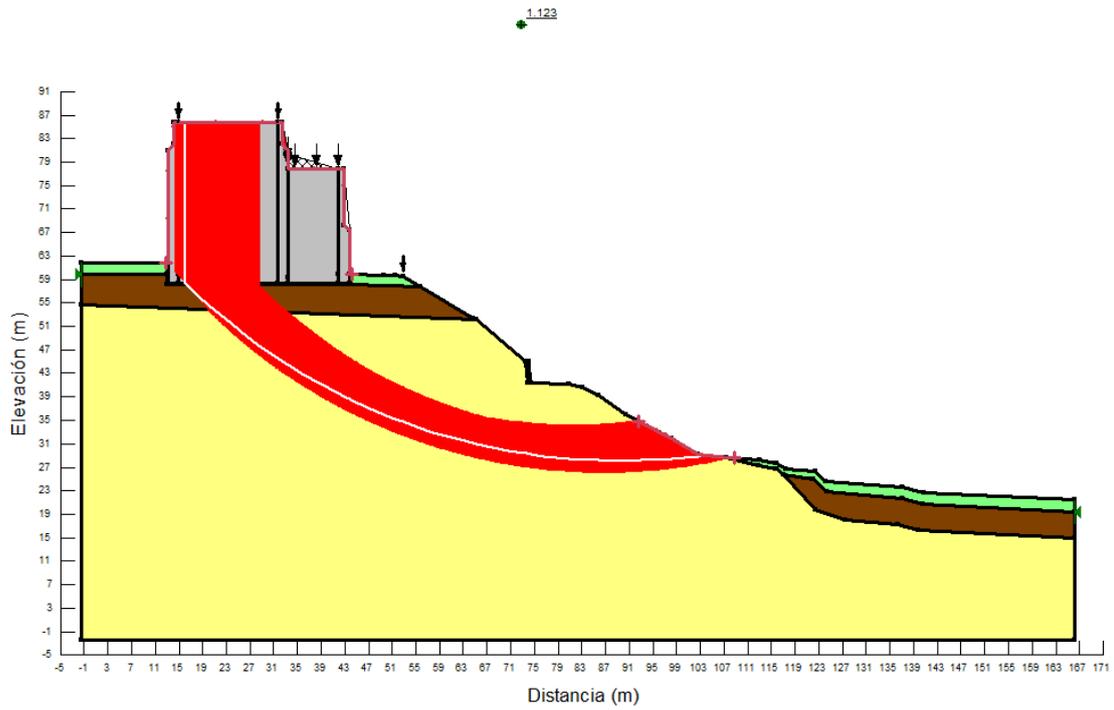


Figura 56.- Mapa de seguridad para un rango de F.S. de 1.123-1.129.

2) A.2.- Hipótesis con las terrazas saturadas y sin sismo.

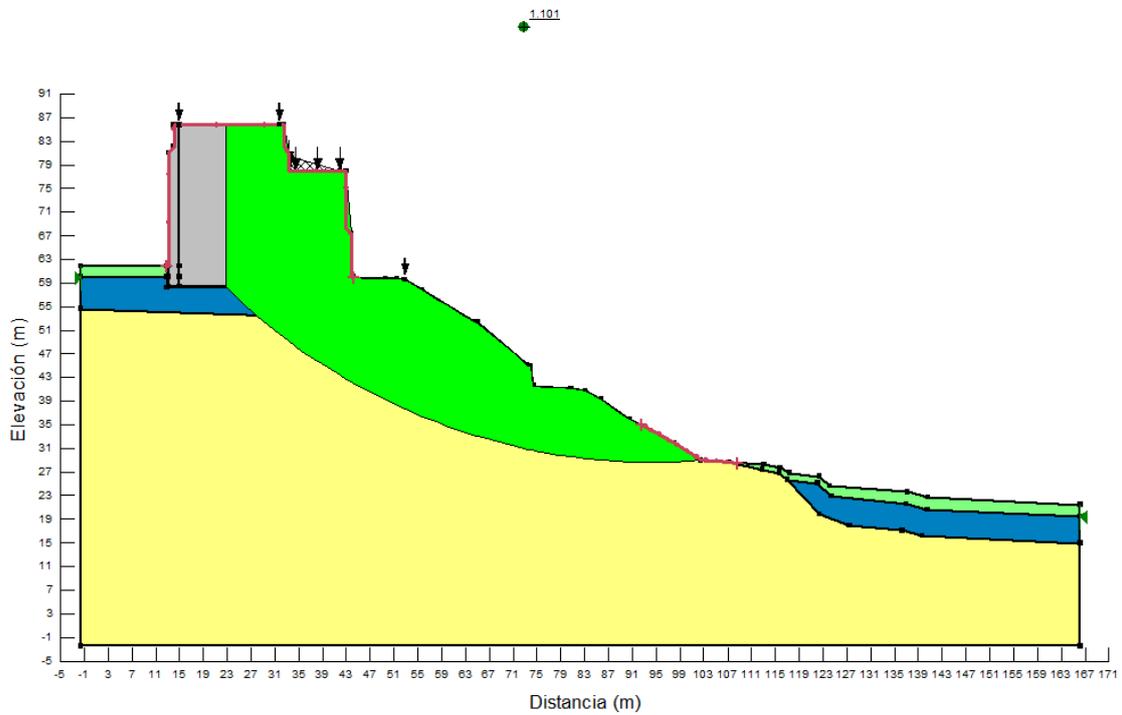


Figura 57.- Superficie de deslizamiento para un F.S.=1.101.

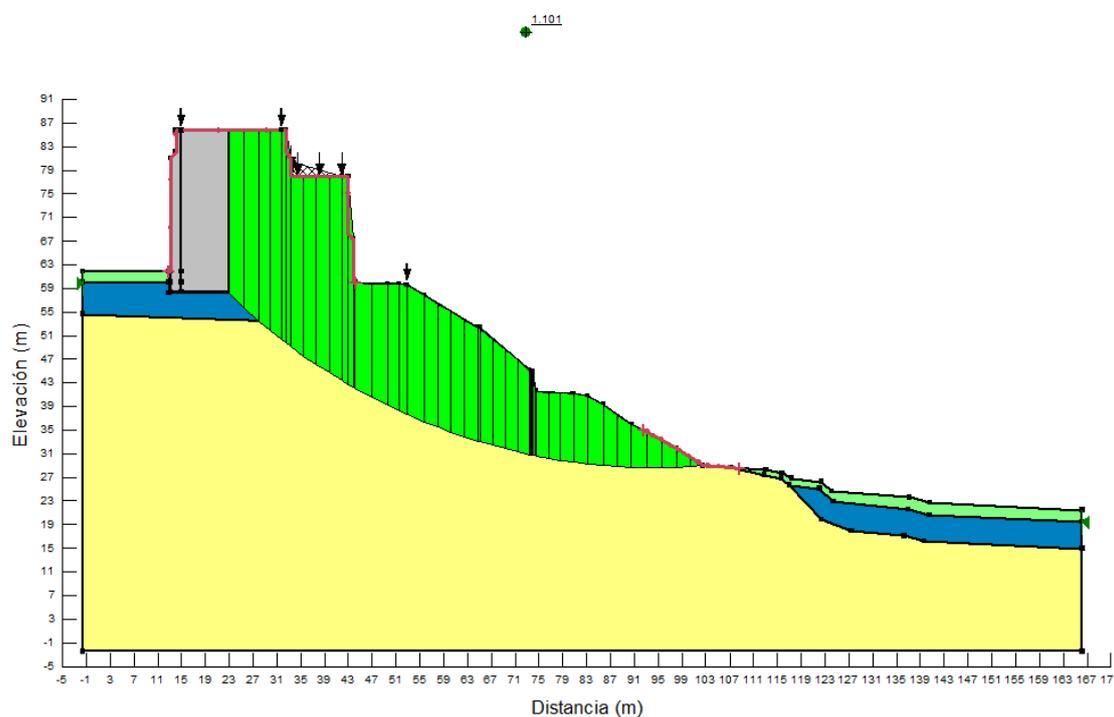


Figura 58.- Rebanadas de la superficie de deslizamiento.

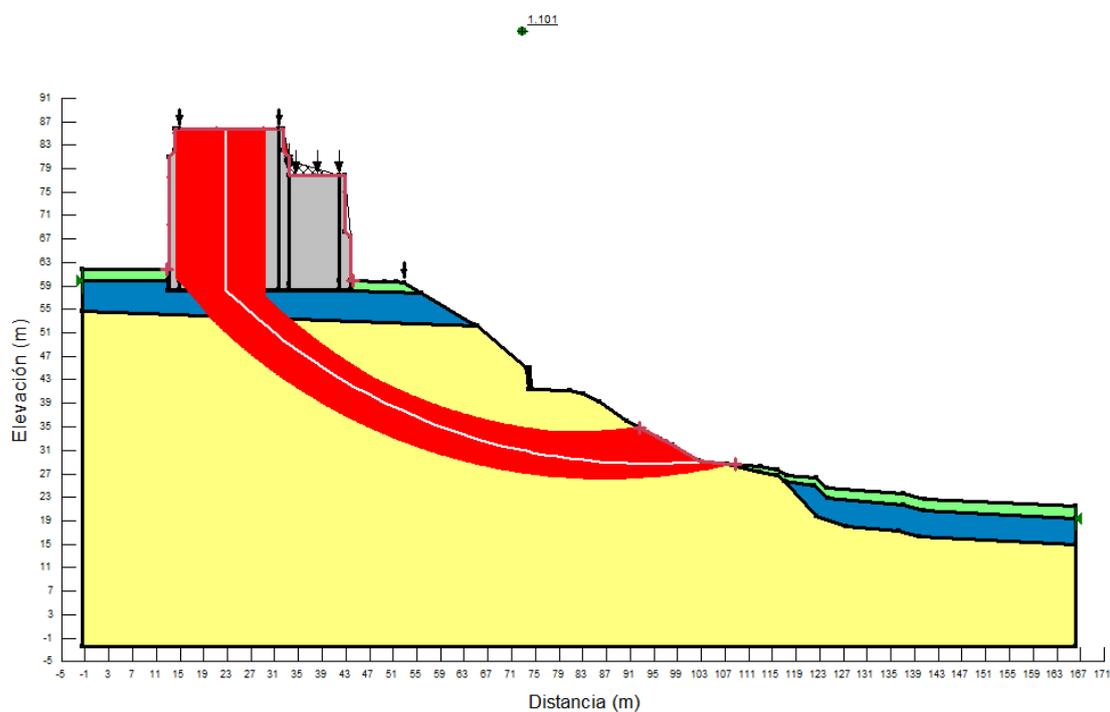


Figura 59.- Mapa de seguridad para un rango de F.S. de 1.101-1.107.

3) A3.- Sin capa freática y con sismo.

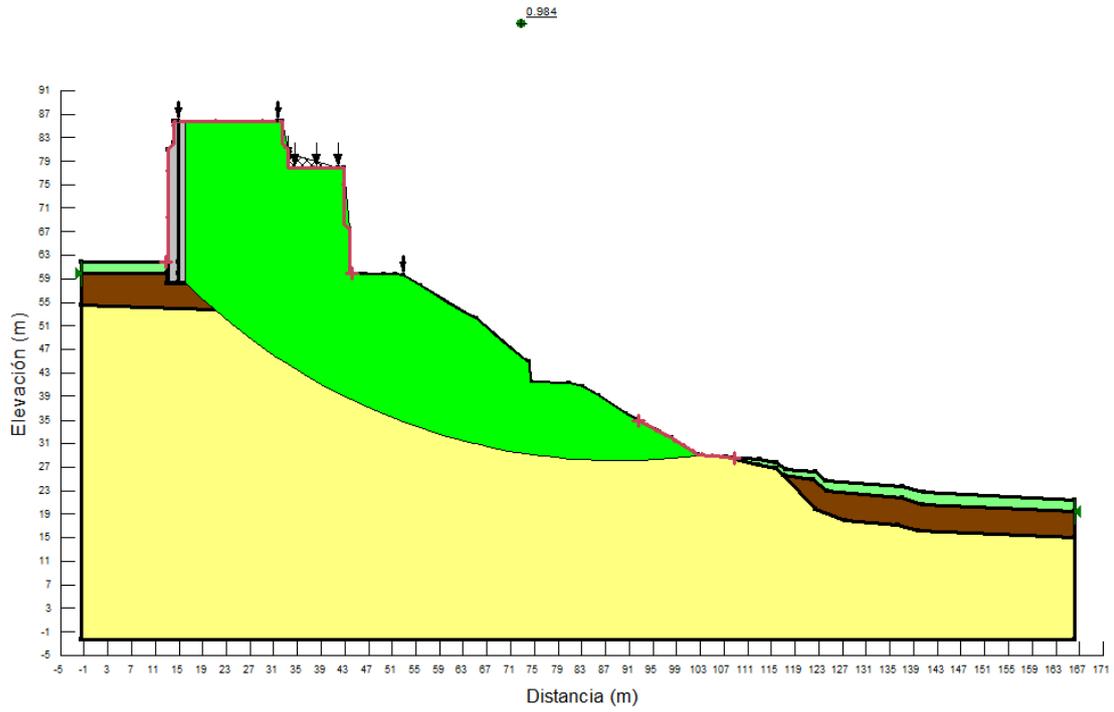


Figura 60.- Superficie de deslizamiento para un F.S.=0.984.

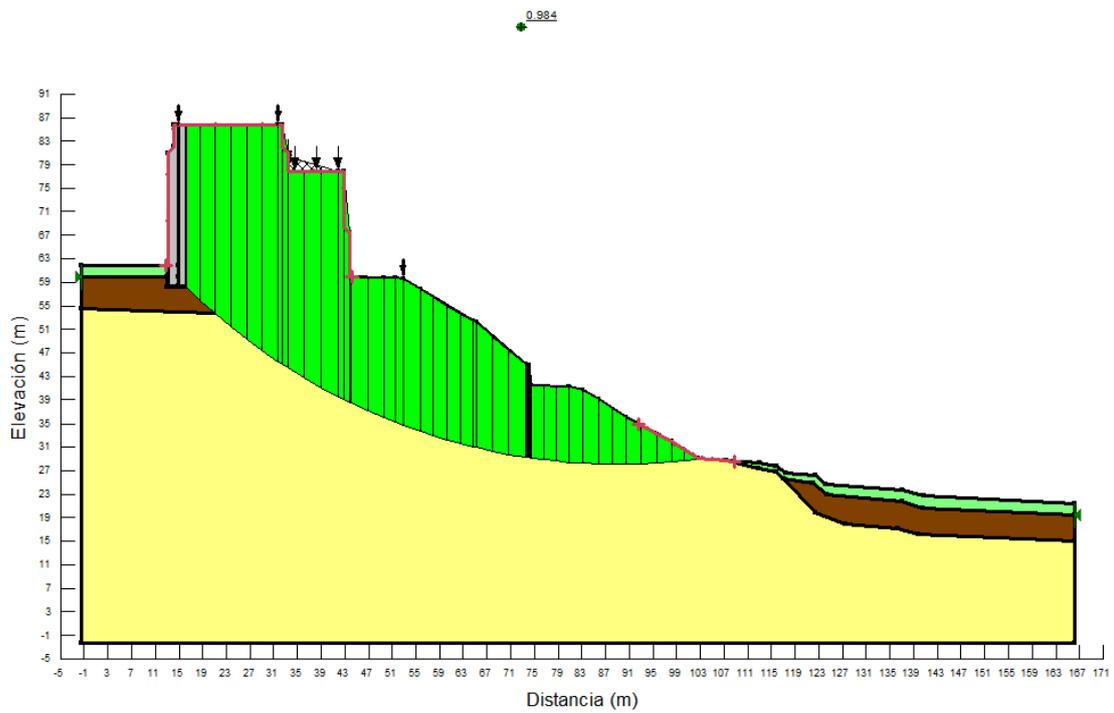


Figura 61.- Rebanadas de la superficie de deslizamiento.

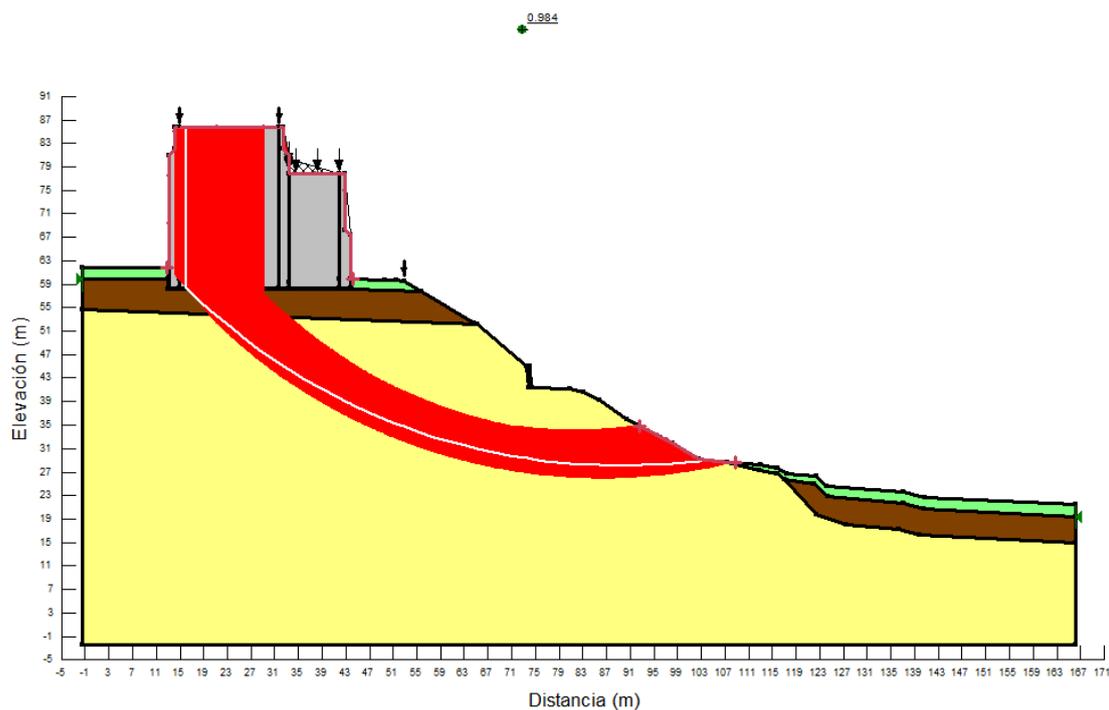


Figura 62.- Mapa de seguridad para un rango de F.S. de 0.984-0.990.

4) A4.- Con las terrazas saturadas y con sismo.

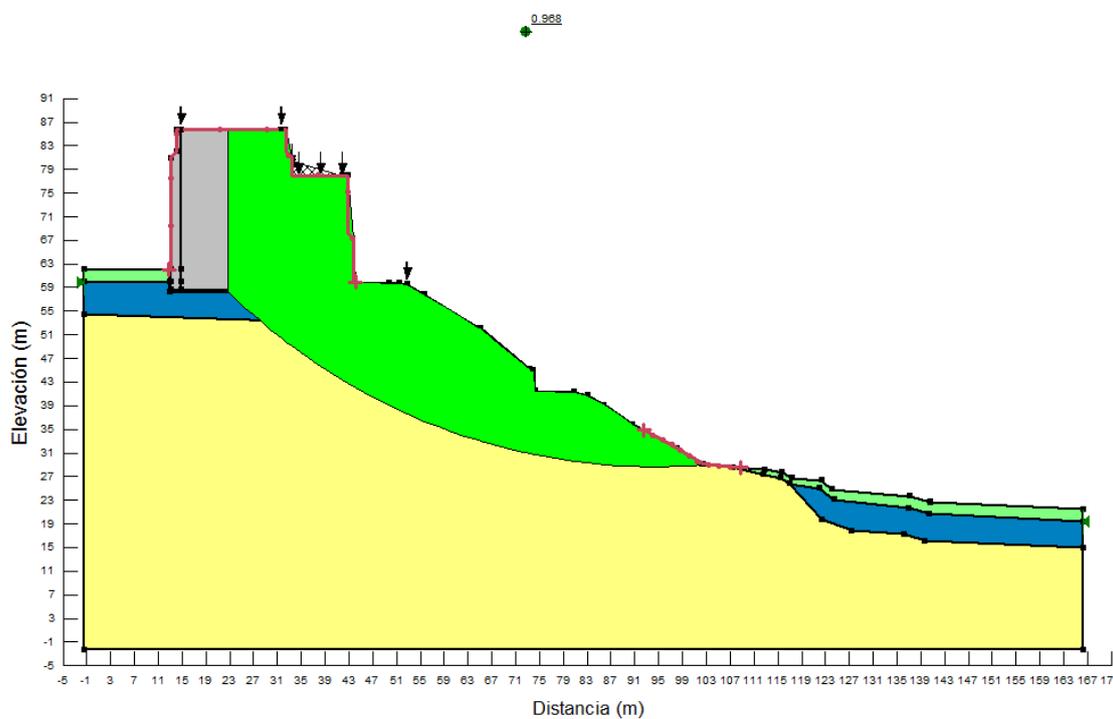


Figura 63.- Superficie de deslizamiento para un F.S.=0.968.

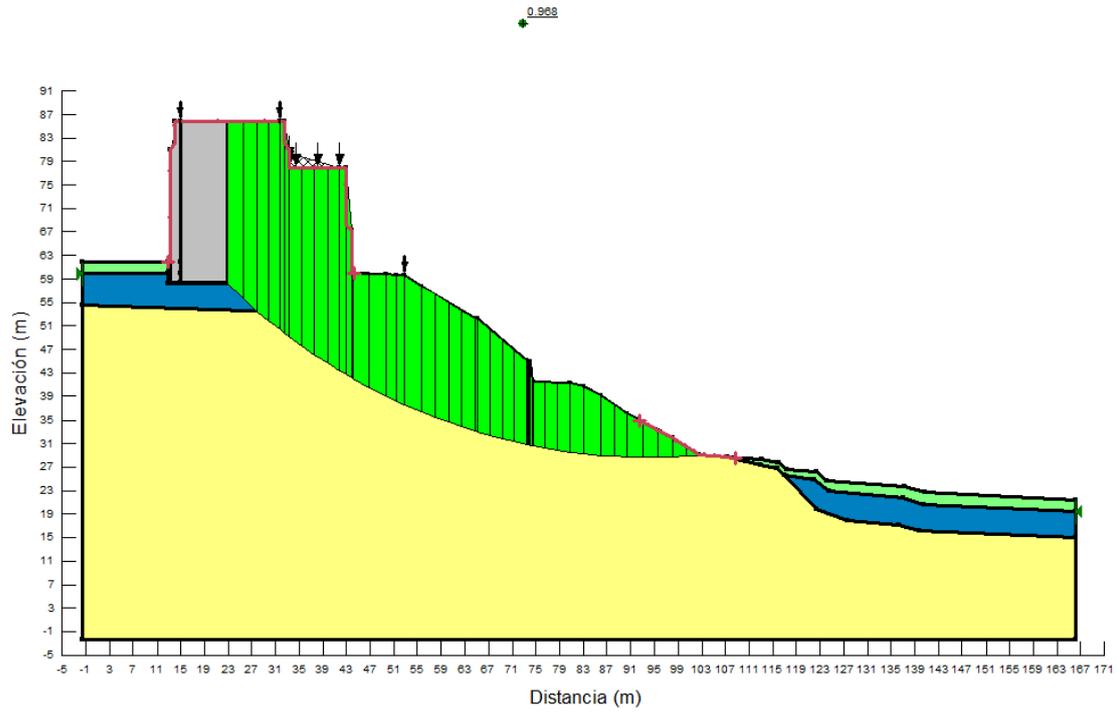


Figura 64.- Rebanadas de la superficie de deslizamiento.

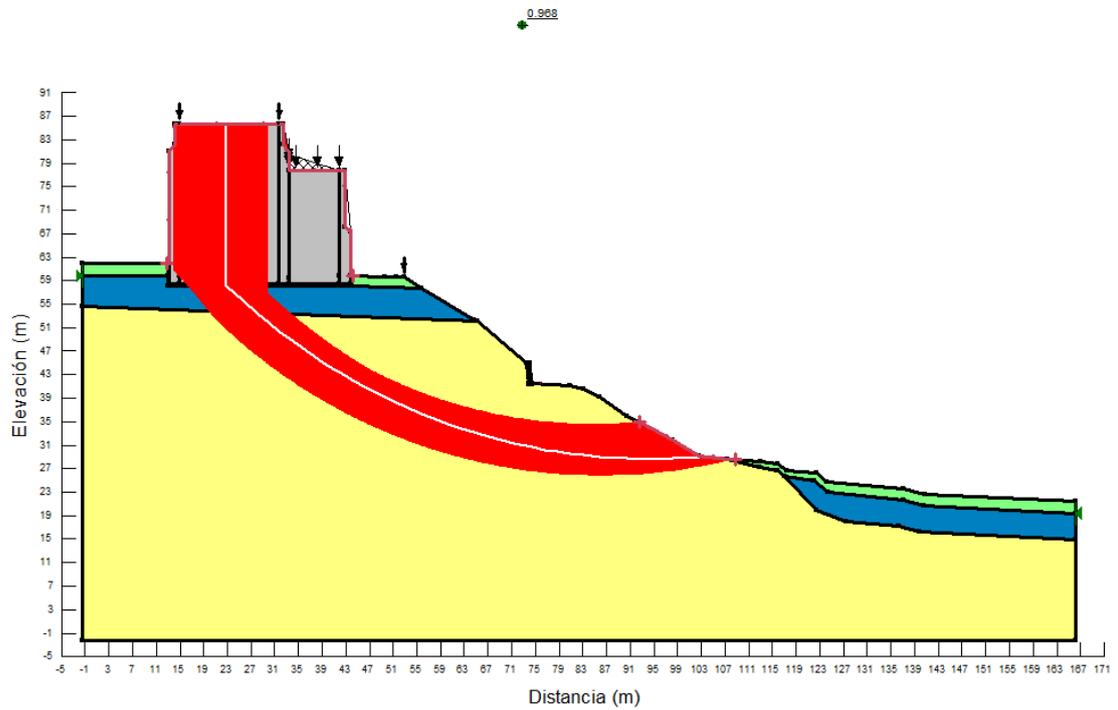


Figura 65.- Mapa de seguridad para un rango de F.S. de 0.968-0.973.

Resultados del Factor de Seguridad con otros métodos

Los resultados mostrados anteriormente en los gráficos de las diferentes hipótesis están calculados con el método de Morgenstern-Price, que es el método que usa el programa por defecto. En la siguiente tabla se muestran los resultados de los mismos análisis, usando otros métodos.

HIPÓTESIS	FACTOR DE SEGURIDAD SEGÚN EL MÉTODO		
	Morgenstern-Price	Bishop	Jambu
Sin agua y sin sismo	1.123	1.125	1.060
Con agua y sin sismo	1.101	1.103	1.039
Sin agua y con sismo	0.984	0.985	0.913
Con agua y con sismo	0.968	0.970	0.901

Tabla 12.- Resultados del F.S. con diferentes métodos de cálculo.

Se puede observar que los resultados obtenidos por el método de Bishop son ligeramente superiores a los obtenidos por Morgenstern-Price, sin embargo, los obtenidos por el método de Jambu son algo inferiores a éstos. Dado que las diferencias son mínimas, se puede decir que usar un método u otro no es significativo.

9.4.3.- Estudio del perfil nº 3.-

El perfil número 3 (Figura 66) va a ser sometido a las mismas situaciones de cálculo que el perfil número 7. Primeramente se representa la sección de la Catedral correspondiente y terreno en este perfil nº 3. En el gráfico aparecen representadas las arcillas limo-arenosas en color amarillo, en marrón las terrazas (en azul si están saturadas), en verde la tierra vegetal y el relleno antrópico y en gris la parte del muro este y el talud de la carretera vieja.

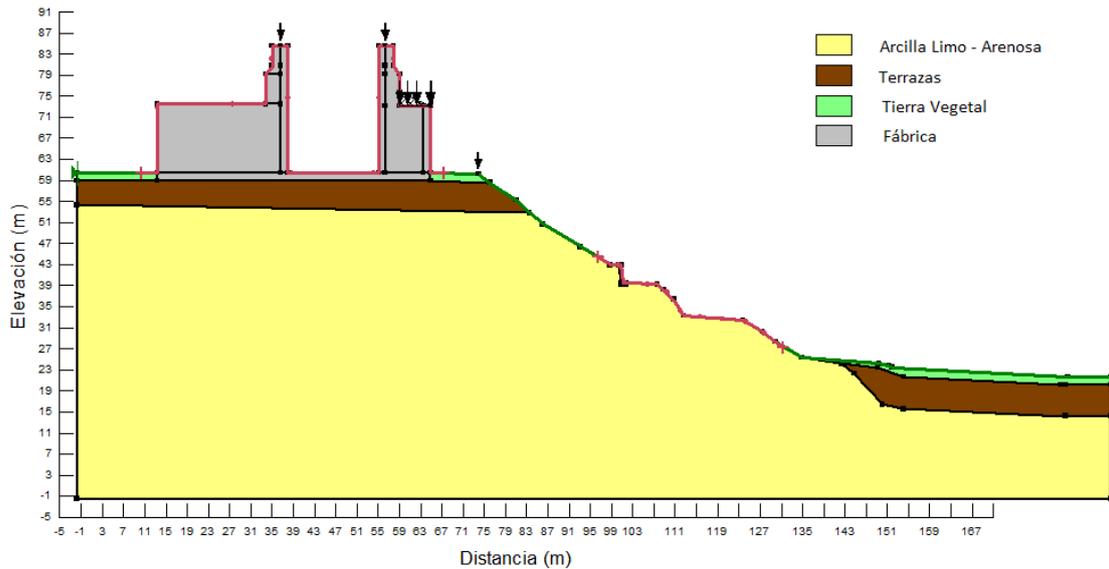


Figura 66.- Perfil n° 3 en Geo-Studio.

Cargas introducidas

Las cargas introducidas son las mismas que las que se han introducido para el perfil n° 7.

Hipótesis planteadas

Los cálculos de estabilidad al deslizamiento se han calculado en diferentes situaciones, teniendo en cuenta los coeficientes sísmicos (k_h y k_v) y una posible saturación de las terrazas. A continuación se dan los gráficos correspondientes a las distintas hipótesis utilizadas:

- Sin capa freática y sin sismo (Figuras 67, 68, y 69).
- Con las terrazas saturadas y sin sismo (Figuras 70, 71, y 72).
- Sin capa freática y con sismo (Figuras 73, 74, y 75).
- Con las terrazas saturadas y con sismo (Figuras 76, 77, y 78).

En el primer gráfico aparece la superficie de deslizamiento crítica con su factor de seguridad correspondiente a cada hipótesis (Figuras 67, 70, 73 y 76). En un segundo gráfico se muestran las rebanadas usadas para el cálculo de la superficie de deslizamiento (Figuras 68, 71, 74 y 77).

Como tercer y último gráfico se presenta el mapa de seguridad (Figuras 69, 72, 75 y 78). Este mapa de seguridad es una forma eficaz de ver gráficamente un resumen de las superficies de deslizamiento del ensayo. Todas las superficies de prueba de deslizamiento válidas se agrupan en bandas con el mismo factor de seguridad. Las bandas están pintadas con colores diferentes, desde el factor de seguridad más alto hasta la banda correspondiente con el factor de seguridad más bajo. En este caso, al estar todos los resultados muy próximos entre sí, solo aparecen pintadas de color rojo. La línea blanca representa la superficie de deslizamiento crítica.

1) B1.- Hipótesis sin capa freática y sin sismo.

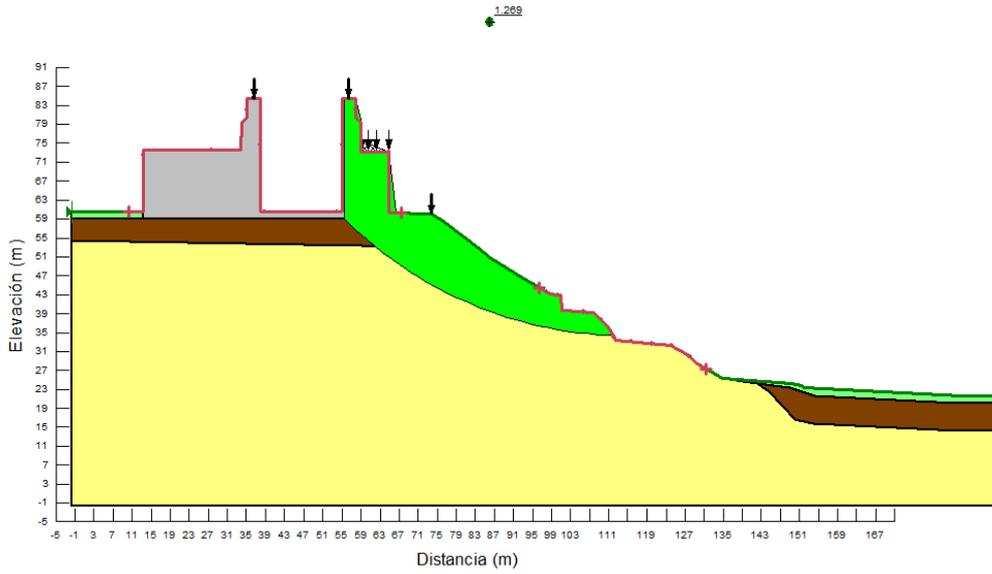


Figura 67.- Superficie de deslizamiento para un F.S.=1.269.

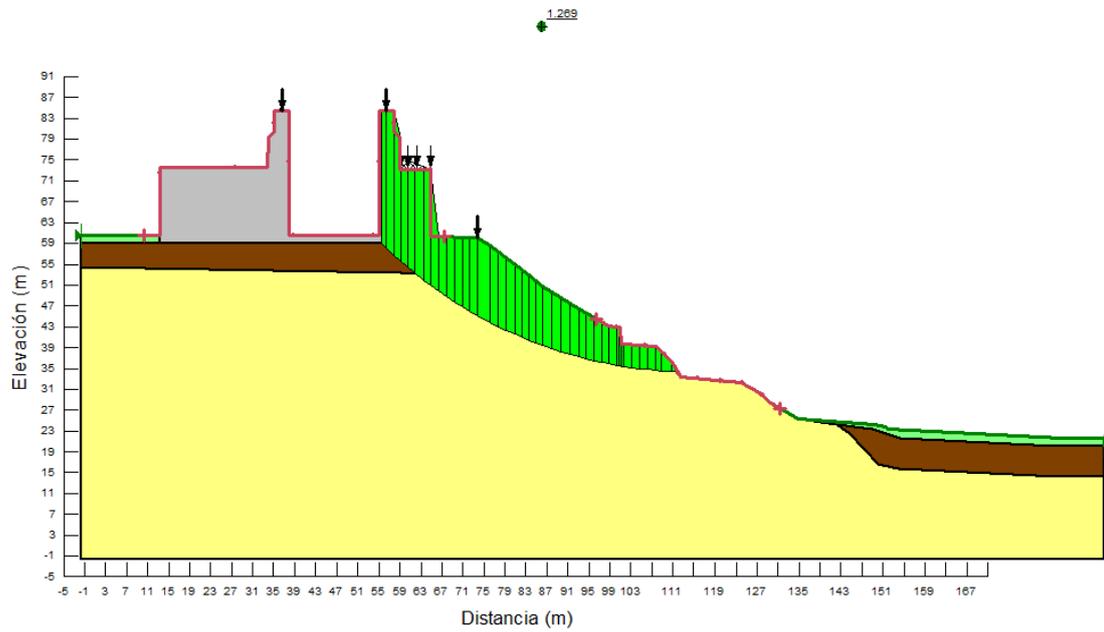


Figura 68.- Rebanadas de la superficie de deslizamiento.

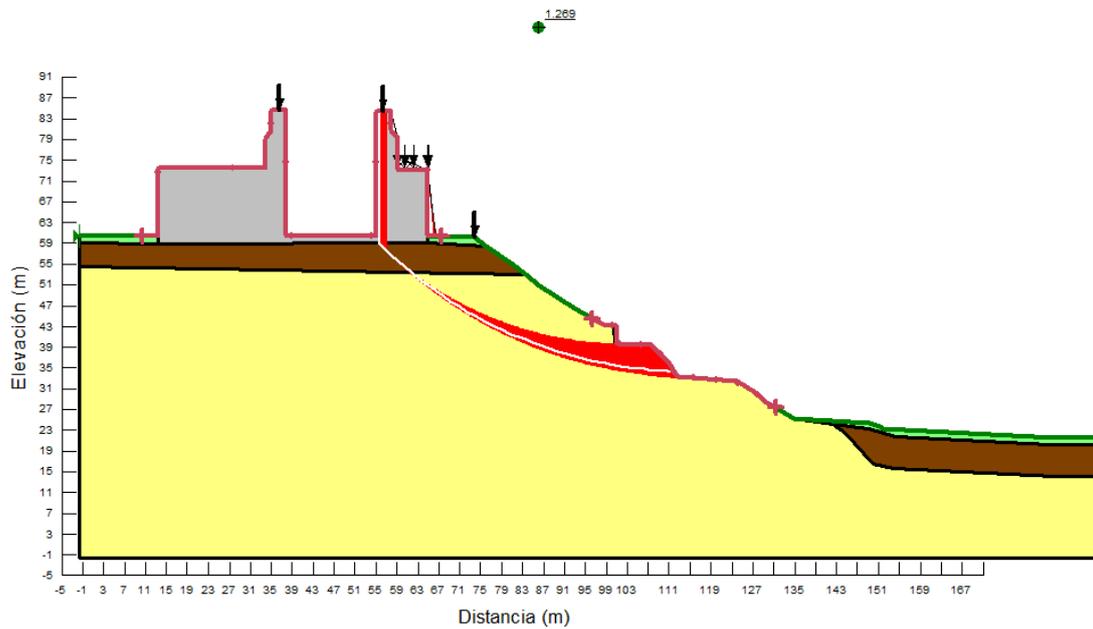


Figura 69.- Mapa de seguridad para un rango de F.S. de 1.269-1.310.

2) B2.- Hipótesis con capa freática y sin sismo.

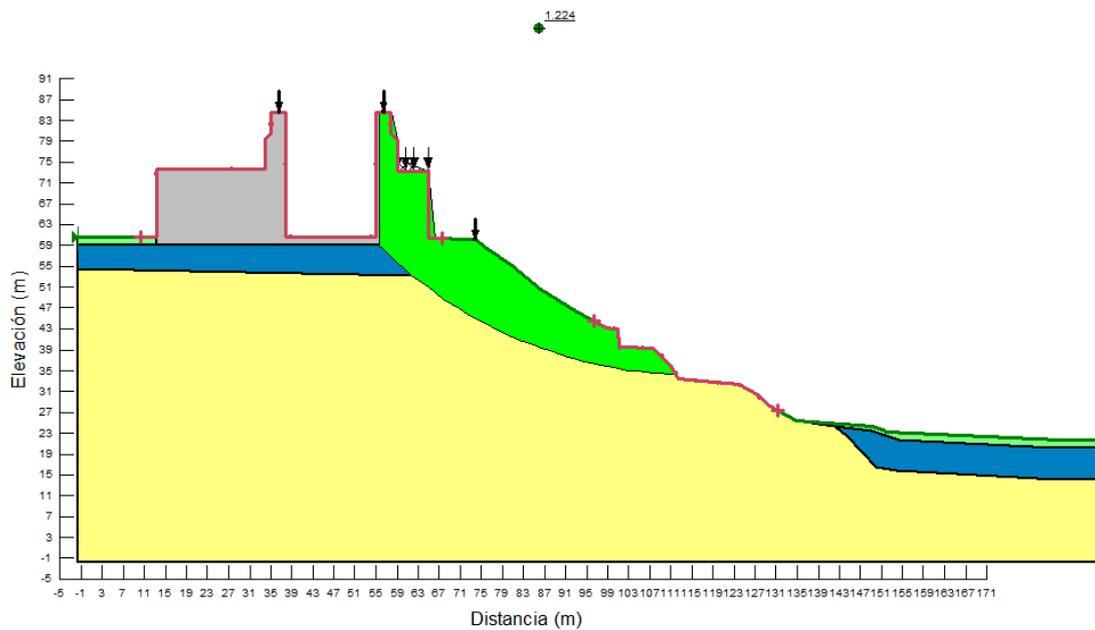


Figura 70.- Superficie de deslizamiento para un F.S.=1.224.

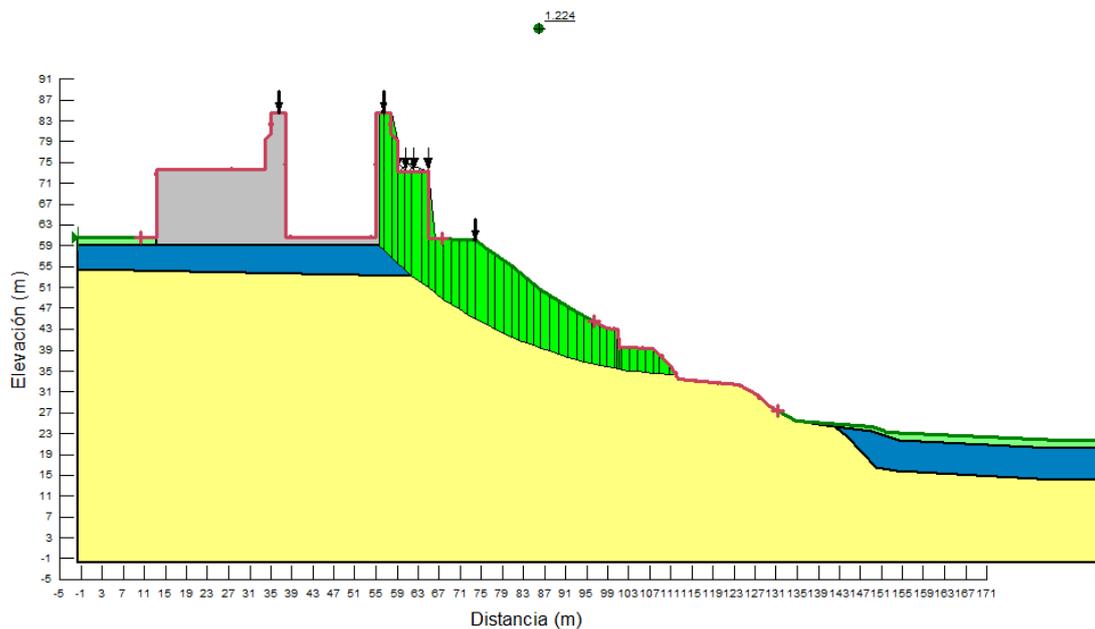


Figura 71.- Rebanadas de la superficie de deslizamiento.

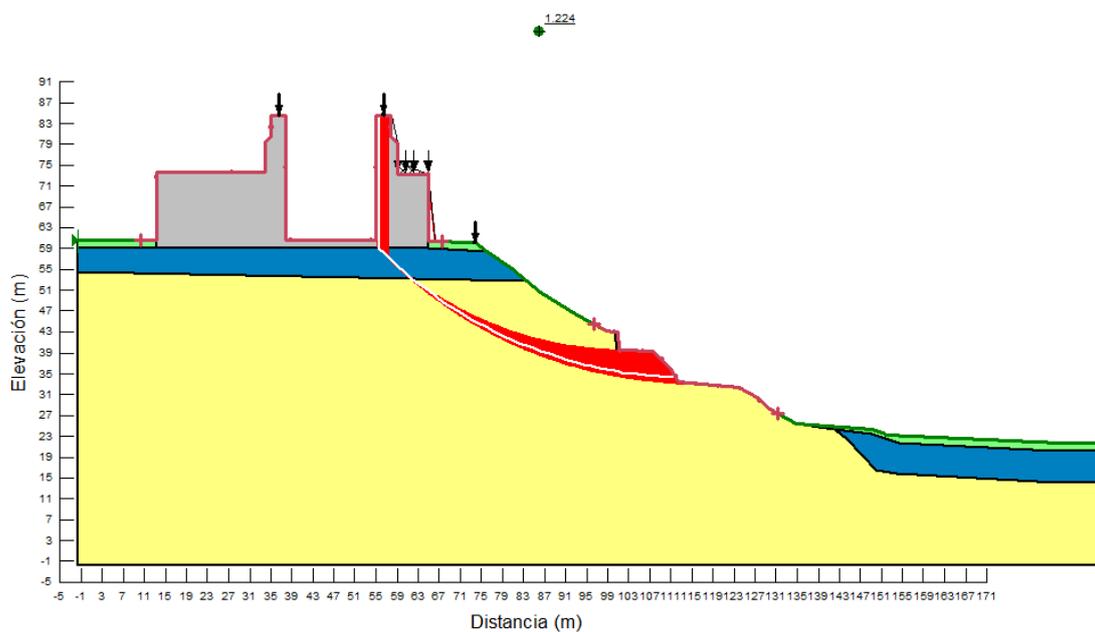


Figura 72.- Mapa de seguridad para un rango de F.S. de 1.224-1.259.

3) B3.- Hipótesis sin capa freática y con sismo.

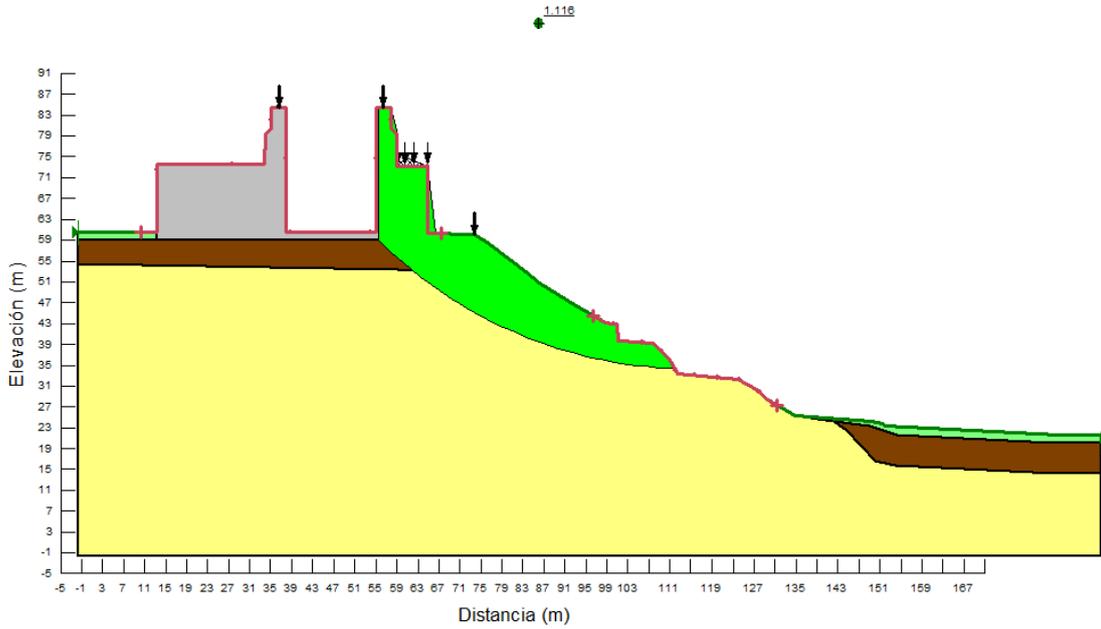


Figura 73.- Superficie de deslizamiento para un F.S.=1.116.

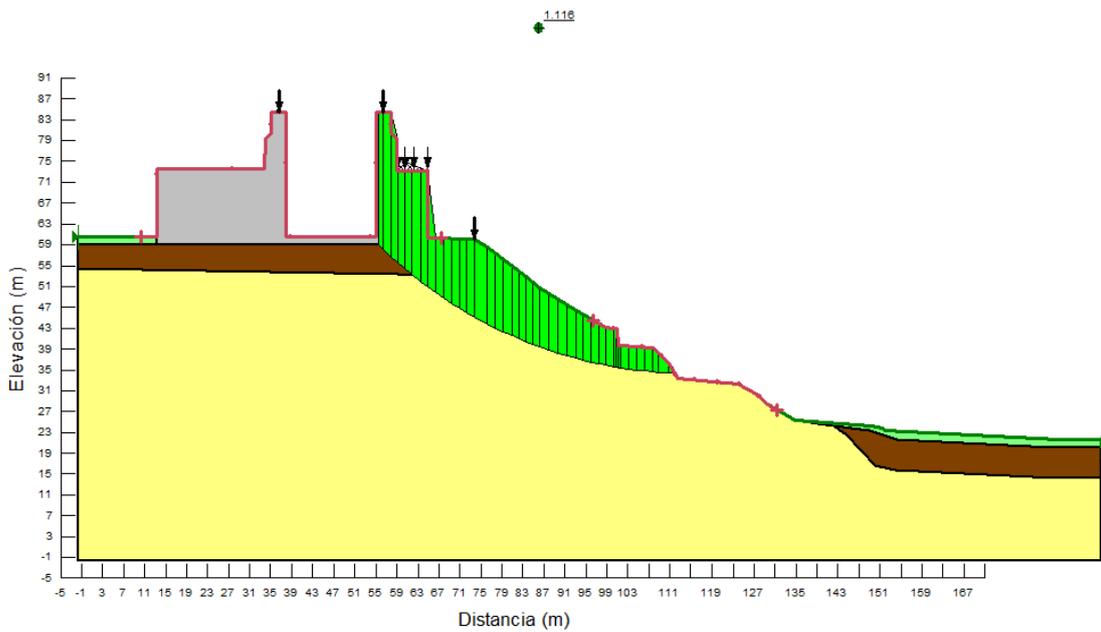


Figura 74.- Rebanadas de la superficie de deslizamiento.

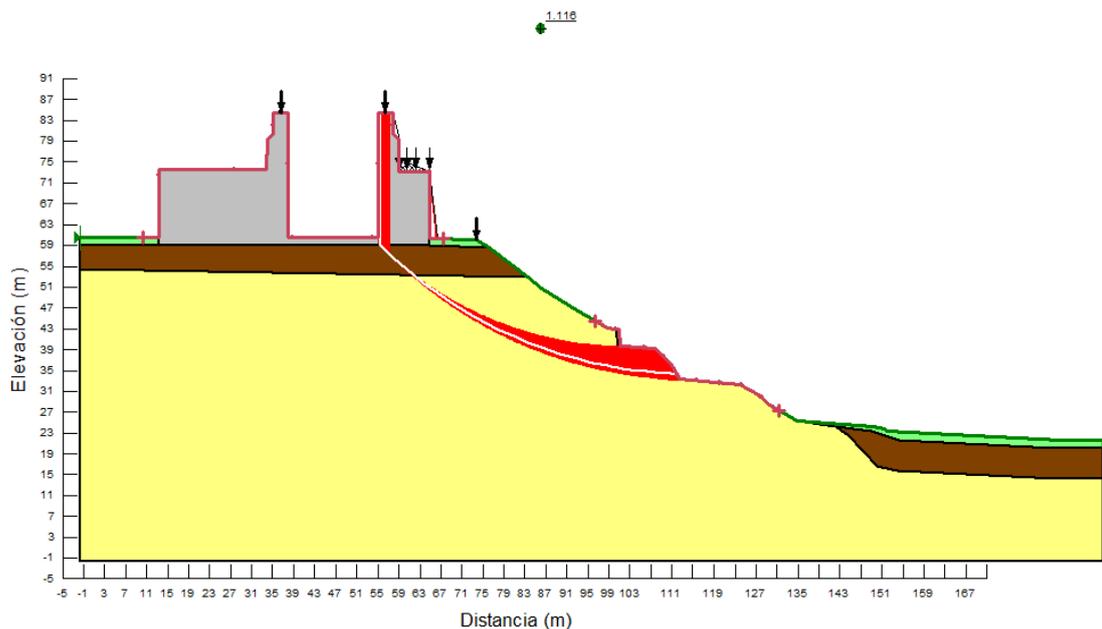


Figura 75.- Mapa de seguridad para un rango de F.S. de 1.116-1.151.

4) B4.- Hipótesis con capa freática y con sismo.

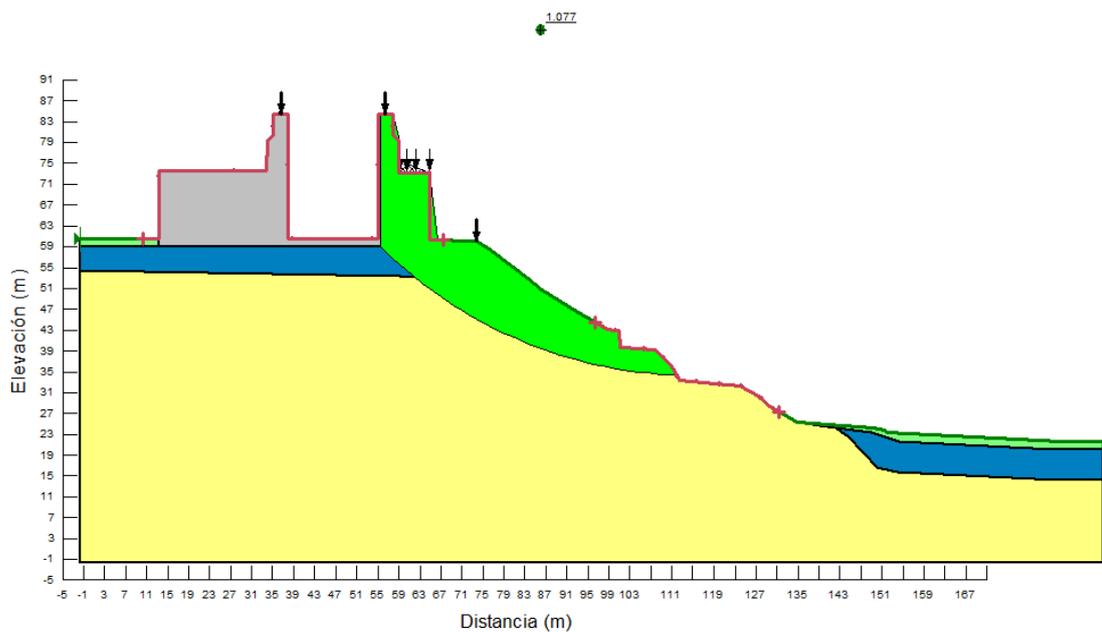


Figura 76.- Superficie de deslizamiento para un F.S.=1.077.

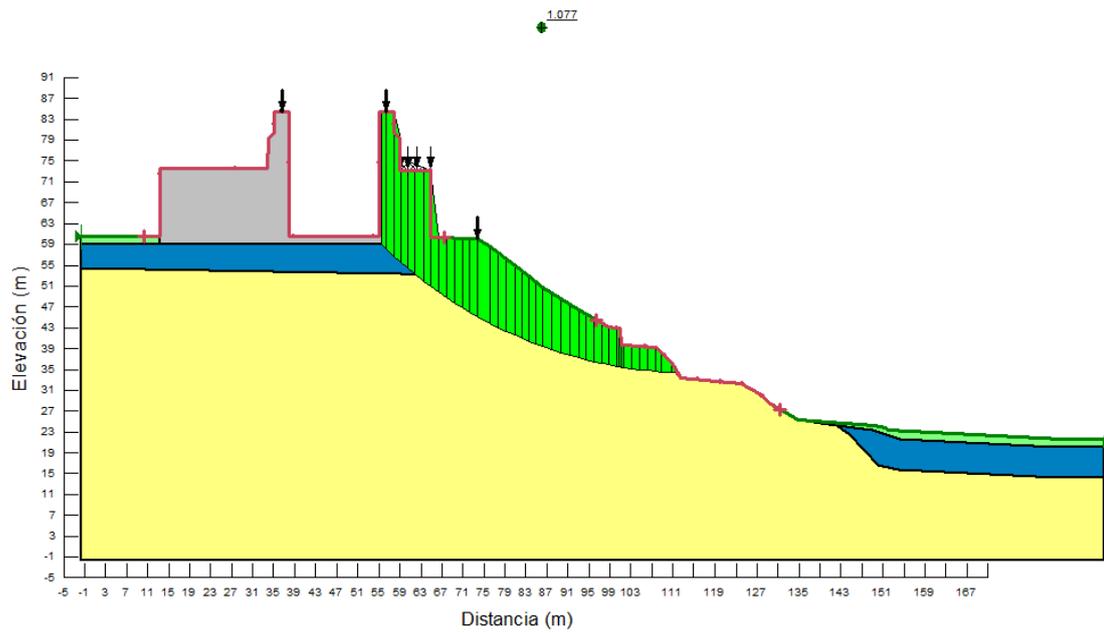


Figura 77.- Rebanadas de la superficie de deslizamiento.

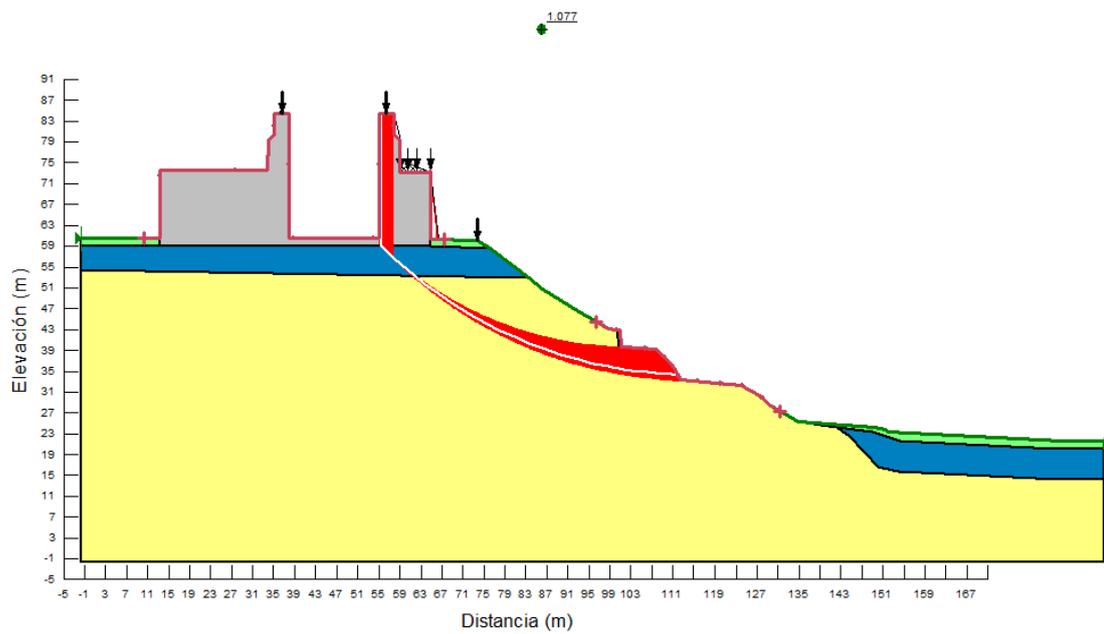


Figura 78.- Mapa de seguridad para un rango de F.S. de 1.077-1.109.

Resultados del Factor de Seguridad con otros métodos

HIPÓTESIS	FACTOR DE SEGURIDAD SEGÚN EL MÉTODO		
	Morgenstern-Price	Bishop	Jambu
Sin agua y sin sismo	1.269	1.278	1.203
Con agua y sin sismo	1.224	1.233	1.162
Sin agua y con sismo	1.116	1.125	1.050
Con agua y sin sismo	1.077	1.086	1.015

Tabla 13.- Resultados del F.S. con diferentes métodos de cálculo.

En esta tabla se vuelve a comprobar que los valores de Bishop son ligeramente superiores y los de Jambu inferiores a los tomados por el método de Morgenstern-Price. Las diferencias entre los métodos no son significativas.

9.4.4.- Estudio del perfil n° 4.-

En este caso el perfil no toca la Catedral, pasa por el oeste.

En el gráfico aparecen representadas las arcillas limo-arenosas en color amarillo, en marrón las terrazas (en azul si están saturadas), en verde la tierra vegetal y el relleno antrópico y en gris el talud de la carretera vieja (Figura 79).

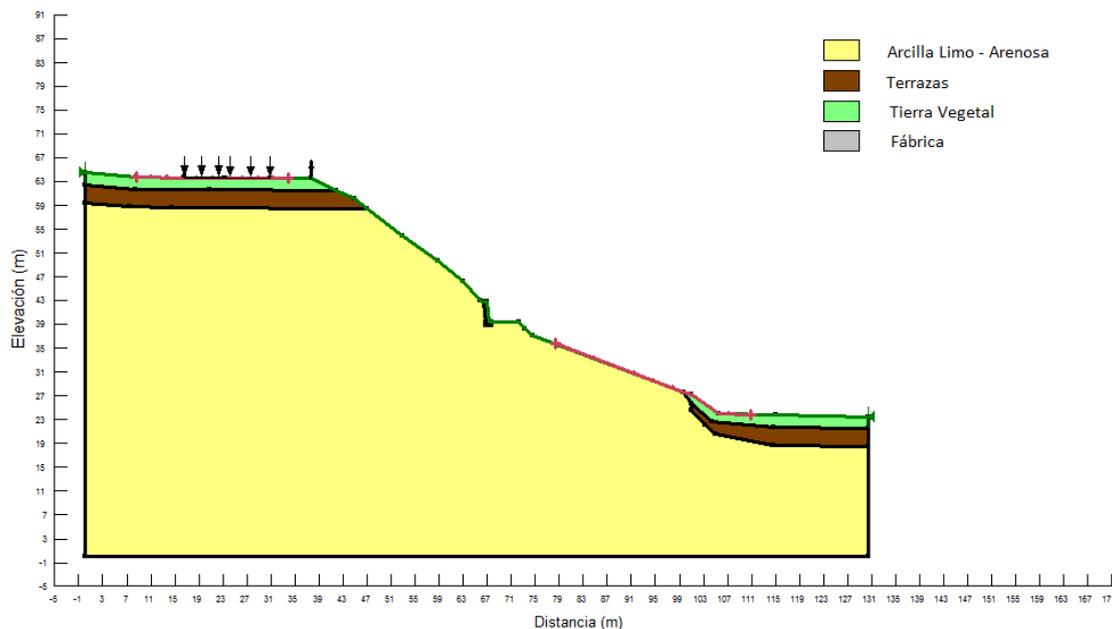


Figura 79.- Perfil n° 4 en Geo-Studio.

Cargas introducidas

En este perfil, al no tener sección de Catedral, no tenemos las mismas cargas. Solamente se tienen las cargas que transmite la solera de la plaza que hay al oeste de la Catedral y la producida por la abalaustrada.

- a) Carga transmitida por la solera de la plaza.

La plaza está constituida por una solera de mortero con áridos gruesos y adoquines, lo que transmite unos 125 kg/m^2 , que son aproximadamente 1.25 kN/m^2 . Dicha solera tiene unos 5 cm de altura (Figura 80).

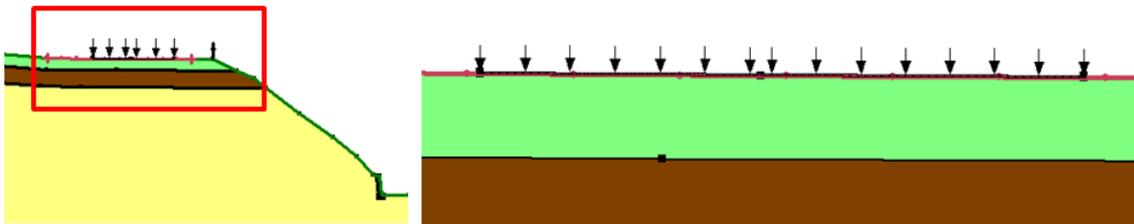


Figura 80.- Carga producida por la solera de la plazoleta.

- b) Carga puntual sobre la corona del talud.

La carga transmitida sobre la corona es en este caso igual que en los anteriores, la carga transmitida por la abalaustrada.

Hipótesis planteadas

En este caso el perfil se calcula bajo dos situaciones. Dado que no se tiene la carga transferida por la Catedral, que hace que la estabilidad del talud aumente, se omiten las hipótesis en las que se ignora el efecto producido por la acción sísmica. Las hipótesis son:

- Sin capa freática y con sismo (Figuras 81, 82, y 83).
- Con las terrazas saturadas y con sismo (Figuras 84, 85, y 86).

1) C1.- Hipótesis sin capa freática y con sismo.

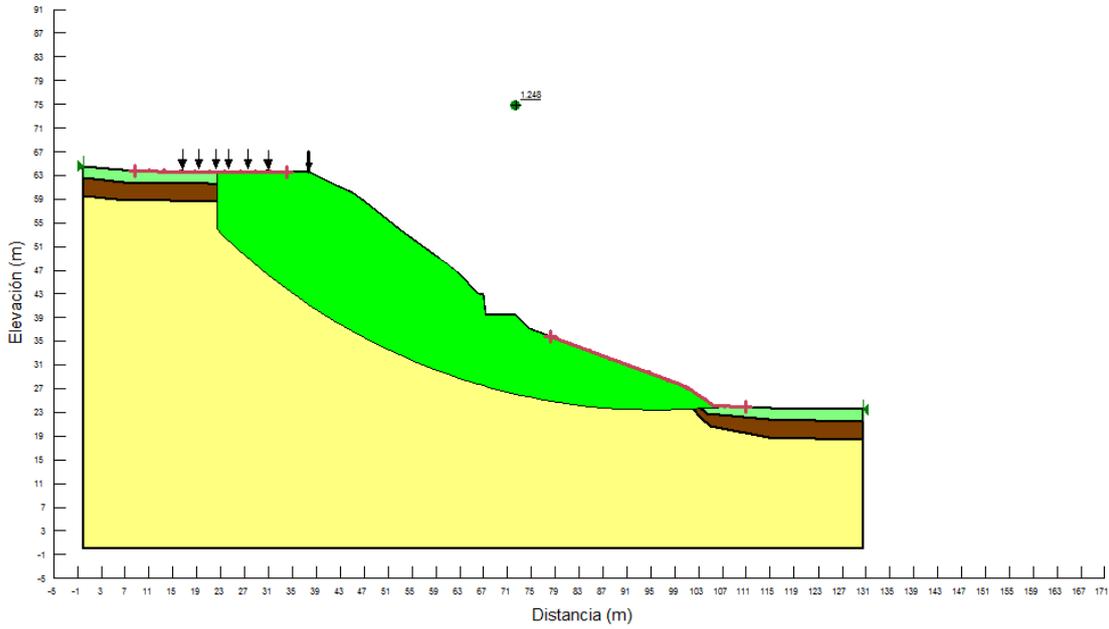


Figura 81.- Superficie de deslizamiento para un F.S.=1.248.

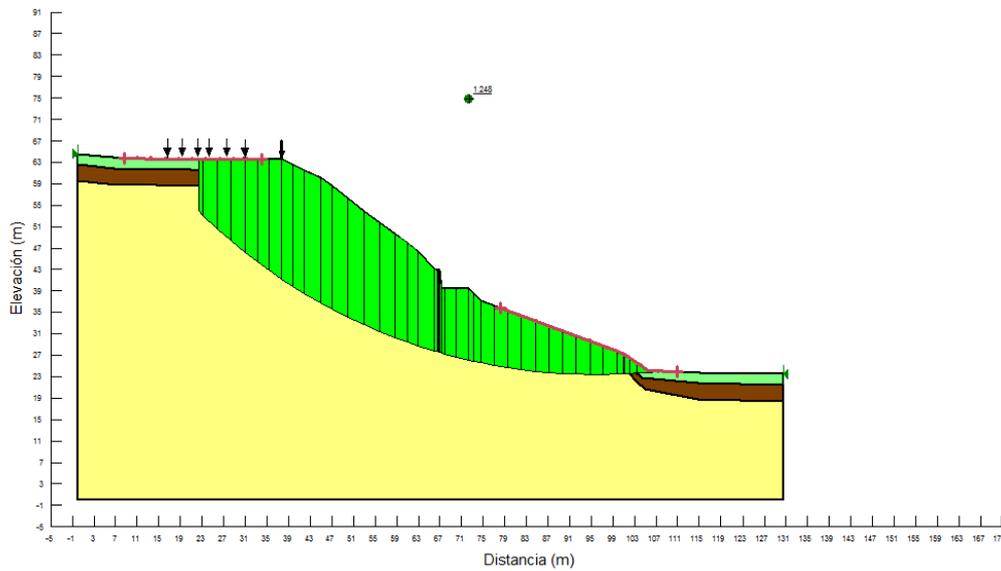


Figura 82.- Rebanadas de la superficie de deslizamiento.

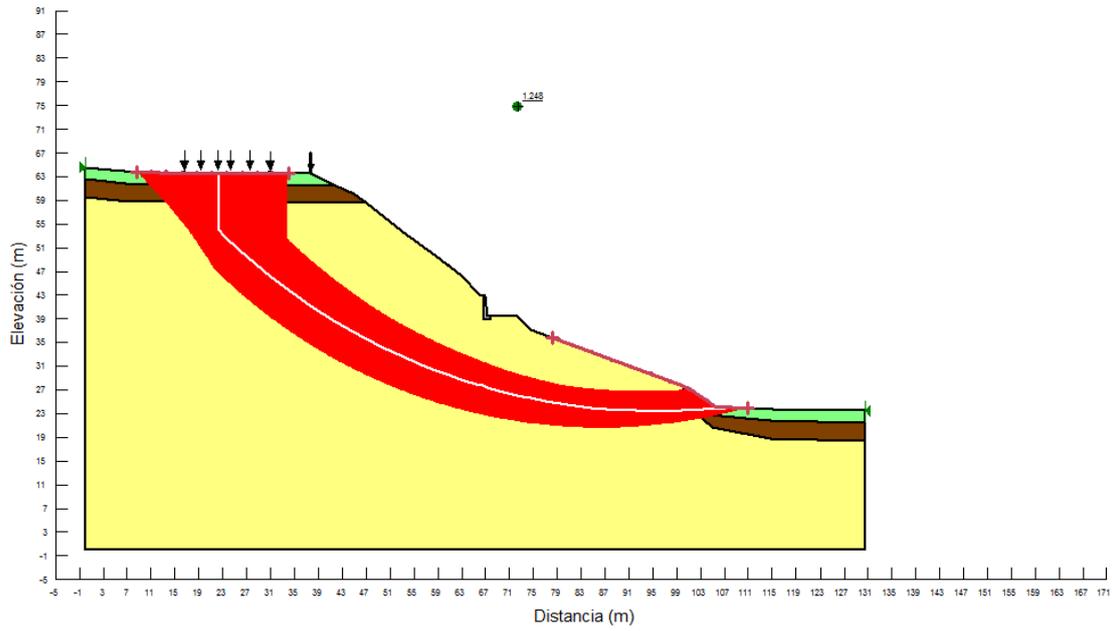


Figura 83.- Mapa de seguridad para un rango de F.S. de 1.248-1.249.

2) C2.- Hipótesis con capa freática y con sismo.

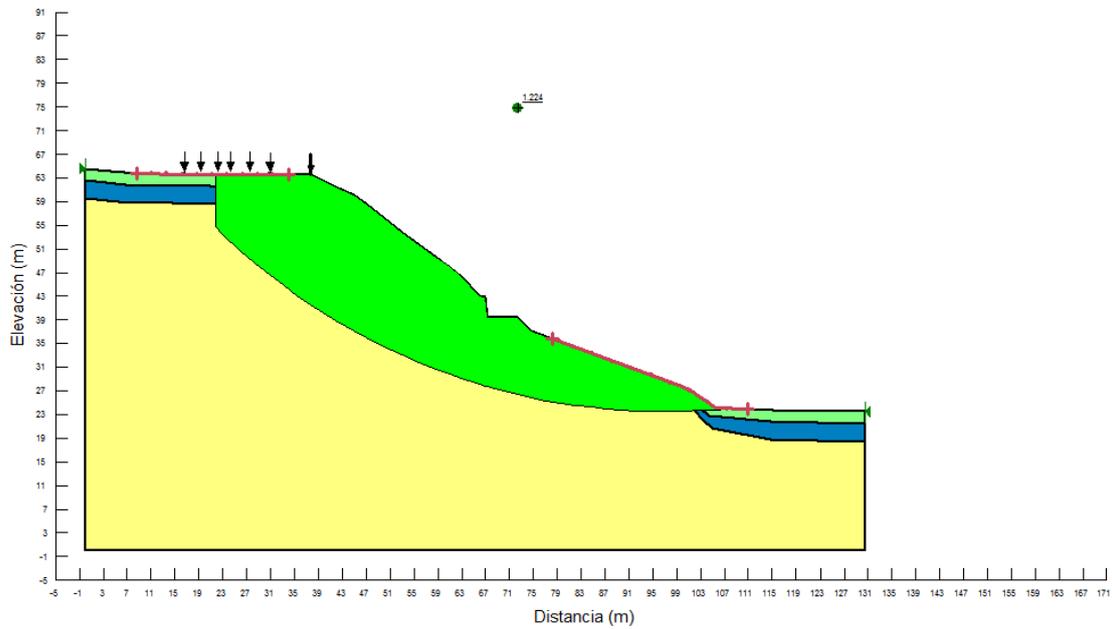


Figura 84.- Superficie de deslizamiento para un F.S.=1.224.

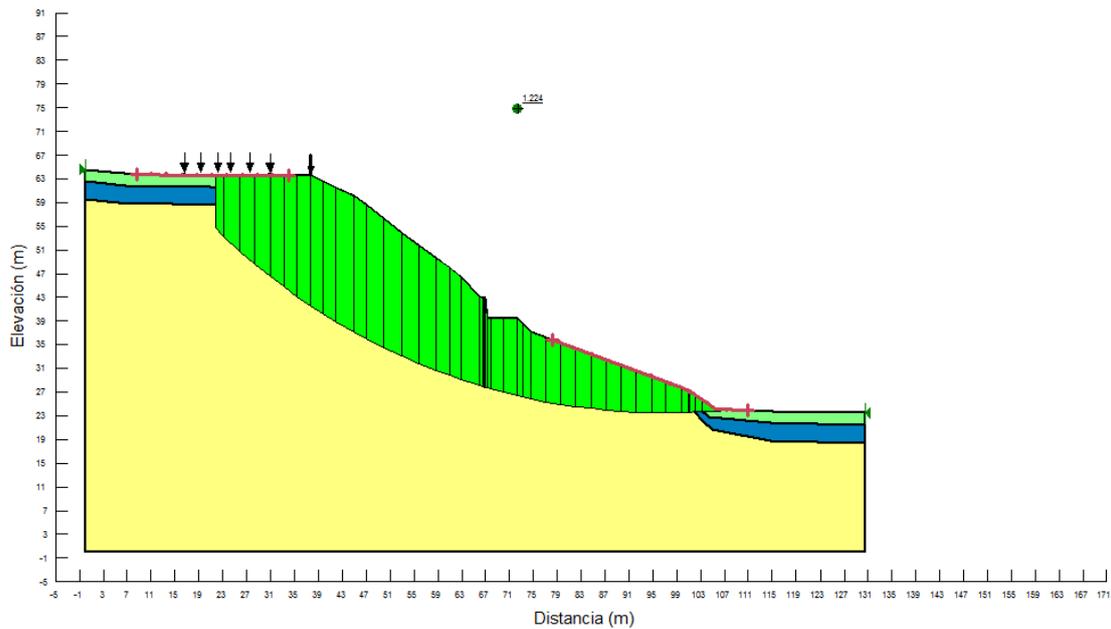


Figura 85.- Rebanadas de la superficie de deslizamiento.

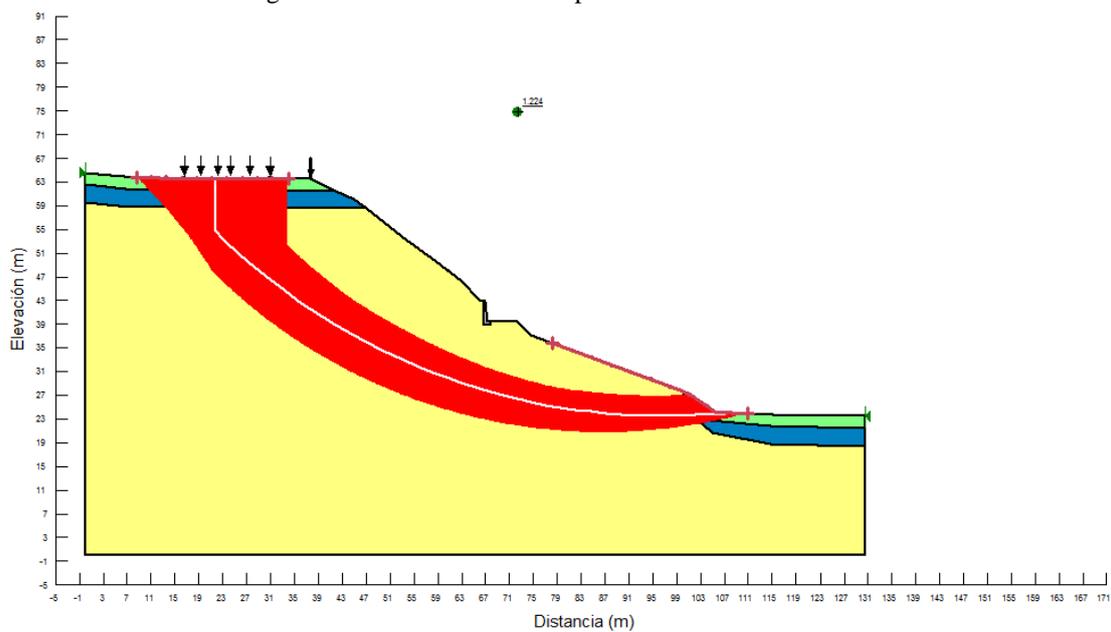


Figura 86.- Mapa de seguridad para un rango de F.S.=1.224-1.249.

Resultado del Factor de Seguridad con otros métodos

HIPÓTESIS	FACTOR DE SEGURIDAD SEGÚN EL MÉTODO		
	Morgenstern-Price	Bishop	Jambu
Sin agua y con sismo	1.248	1.249	1.178
Con agua y con sismo	1.224	1.226	1.157

Tabla 14.- Resultados del F.S. con diferentes métodos de cálculo.

Se obtienen las mismas características que en las tablas anteriores.

9.4.5.- Resultados.-

En la siguiente tabla se muestra un resumen de datos de todas las hipótesis realizadas, señalando en cada caso la situación más desfavorable y tomando como valores de los factores de seguridad correspondientes los obtenidos por el método de Morgenstern-Price. Posteriormente se describe un breve resumen de la situación de cada perfil analizado.

PERFIL	HIPÓTESIS	FACTOR DE SEGURIDAD
<u>PERFIL N° 7</u>	A1	1.123
	A2	1.101
	A3	0.984
	A4	0.968
<u>PERFIL N° 3</u>	B1	1.269
	B2	1.224
	B3	1.116
	B4	1.077
<u>PERFIL N° 4</u>	C1	1.248
	C2	1.224

Tabla 15.- Resumen de todas las hipótesis.

a) Perfil número 7:

En el caso del perfil n°7, las hipótesis que tienen un coeficiente por encima de 1 son las correspondientes a las hipótesis A1 y A2, es decir, las situaciones en las que no se ven afectadas por un sismo y en el caso de la A2 con las terrazas saturadas. De todas formas ambos factores de seguridad al deslizamiento no son muy grandes, 1.12 y 1.10 respectivamente.

La aplicación del sismo, según la norma NCSE-02, con un valor de $a_c = 0.067g$, hace que el talud se haga inestable tanto en presencia o no de agua en las terrazas. Si a esto le añadimos la saturación de las terrazas, el talud se vuelve aún más inestable.

Las bandas de superficies de prueba de deslizamiento en todas las hipótesis están muy próximas a 1 para el factor de seguridad, sobre todo las A2, A3 y A4. Esto indica que en el caso de darse o haberse dado una situación con actuación de una acción sísmica igual o superior a la de cálculo ($a_c = 0.067g$) o una posible saturación de las terrazas, ambas hipótesis por separado o a la vez, producen una zona de inestabilidad en el muro este de la Catedral. Esta inestabilidad podría traducirse en asientos variables de la cimentación del muro, lo que podría significar la aparición de grietas verticales.

b) Perfil número 3:

Para este perfil se han estudiado las mismas hipótesis que en el caso anterior. Vemos que las hipótesis en las que no consideramos la acción sísmica, B1 y B2, tiene un coeficiente de seguridad estable (1.269 y 1.224 respectivamente), incluso considerando

la saturación de las terrazas (B2). Sin embargo, si se tiene en cuenta esta acción sísmica definida según la Norma, los coeficientes de estabilidad se reducen.

Estos valores son próximos a 1 (1.116 si consideramos las terrazas secas y 1.077 si las consideramos saturadas), por lo que el talud estaría en una situación de riesgo.

c) Perfil número 4:

En este caso sólo se han tenido en cuenta las hipótesis bajo la acción sísmica, con y sin las terrazas saturadas. En ambos casos, C1 y C2, los resultados obtenidos de los coeficientes de seguridad son aceptables (1.248 y 1.224 respectivamente). Hay que decir que en esta ocasión el perfil no tiene sección alguna de la Catedral, por lo que el talud tiene menos solicitud y los factores de seguridad obtenidos son los mayores.

Lógicamente la pendiente media del talud también influye en la variación del factor de seguridad al deslizamiento para los mismos materiales. Si se considera la pendiente media desde el borde superior del talud hasta la coronación del muro de sostenimiento de la carretera antigua que bordea la Catedral, se tiene que (Tabla 16):

PERFIL N°	PENDIENTE MEDIA (%)	PENDIENTE MEDIA (°)
7	71	35.51
3	74	36.46
4	75	36.81

Tabla 16.- Pendiente media de los perfiles.

Se aprecia que los perfiles tienen una pendiente media muy similar. El perfil nº 4 es el que mayor pendiente media tiene, no por ello es la situación con mayor inestabilidad. Esto es debido a que no tiene carga transmitida por la Catedral. Sin embargo, y a pesar de tener la pendiente media menor, el perfil nº 7, es el que tiene menor coeficiente de seguridad; es lógico que sea menor que en el nº 3 (la situación más similar), dado su mayor proximidad al borde del talud (en torno a 1.5 m). Esto influye no sólo en la reducción del coeficiente de seguridad, sino en la cantidad de la ladera a fallar o deslizar.

9.4.6.- Conclusión.-

Los cálculos y los resultados obtenidos están sujetos a la proximidad de los datos previos y básicos en los que se basan todos los cálculos, es decir, sin una posible comprobación del grado de fiabilidad que tienen estos datos con la realidad, no se puede asegurar que grado de realismo o fiabilidad tienen los resultados obtenidos.

Por lo tanto, teniendo en cuenta los resultados obtenidos se puede concluir que:

- En la situación normal actual, es decir, sin saturarse las terrazas y sin la acción de ningún sismo, el talud próximo a la fachada sur de la Catedral es estable, a pesar de que el perfil nº 7 está en una situación muy cercana al límite (F.S. = 1.123).
- La acción en cualquier perfil de la saturación de la zona de las terrazas (lógicamente aumentando ésta de peso) y por supuesto la actuación de sismos

mínimos (el mínimo calculado según la norma NSCE-02) producen la inestabilidad de la ladera, proporcionando zonas de situación casi límite en el muro este y en el resto del talud.

- Con todo lo anterior podemos afirmar que la situación de la Catedral esta casi al límite tanto a nivel tensional como deformacional en la zona este-sur (la del ábside y la sacristía).
- A pesar de esta situación crítica, en la actualidad la Catedral sigue en pie y el talud no ha deslizado, sin embargo sí que han aparecido grietas en la fachada este de la Catedral. Por lo tanto, y como es de esperar, la situación real no es absolutamente fiel a la situación teórica.
- Teniendo en cuenta todas estas cosas, se podría decir que estas grietas podrían estar provocadas por un posible asiento diferencial debido a la mala disposición de la Catedral sobre un terreno arcilloso con una pequeña cantidad de terrazas a nivel superficial. Además de muy próxima al borde de un talud de altura considerable y que probablemente el terremoto de Lisboa de 1755 terminó por desequilibrar y con ello comenzó la aparición de dichas grietas. También hay que añadir que si en algún momento de la historia, antes del terremoto, hubiera habido algún grado de saturación de las terrazas de apoyo de cimientos, probablemente ya se habrían producido asientos y movimientos no deseados, con lo que habrían salido pequeñas fisuras localizadas tanto en el muro como en alguna zona de plementería entre los nervios de bóveda. Si esa posible saturación hubiera sucedido después del terremoto, esto ayudaría al incremento de dichas grietas originadas por los daños del terremoto.

10.- Técnica de láser escáner.-

10.1.- Objetivos.-

Para el estudio de deformaciones en la estructura de la Catedral de Santa María de la Asunción de Coria se hace necesaria la representación tridimensional de la estructura entera mediante la técnica de láser escáner. El láser escáner es capaz de efectuar levantamientos topográficos de una forma rápida y eficaz de estructuras con una precisión de pocos milímetros. Además, es una técnica muy útil para generar levantamientos tridimensionales de edificios de gran tamaño o de difícil acceso.

Por tanto, los objetivos del modelo tridimensional de la Catedral son:

- Generar un modelo tridimensional que permita identificar fallos estructurales como grietas. Los datos que proporcionan los instrumentos que miden movimientos, giros y aberturas de fisuras son puntuales mientras que el láser escáner permite conocer el movimiento global de toda la estructura.
- Obtener ortofotografías para posteriormente generar planos en 2D que permitan representar la geometría real de la Catedral.
- Posteriormente, superponer el modelo tridimensional con los datos termográficos para obtener aquellas humedades que estén deteriorando la construcción.

10.2.- Instrumental.-

Para la inspección métrica de la Catedral de Santa María de la Asunción de Coria se ha utilizado el TLS Leica ScanStation C10. Este equipo mide distancias en un rango de 1,5 a 300 m, con una precisión nominal de ± 6 mm a una distancia de 50 m con iluminación normal y en condiciones normales de reflectividad, teniendo en cuenta que no se ha realizado ninguna medición mayor a 50 metros. El campo de visión vertical tiene una amplitud de 270° (grados sexagesimales) y 360° en el plano horizontal. Captura un máximo de 50.000 puntos por segundo.

El software utilizado para el tratamiento de los datos es Leica Cyclone 7.4.

10.3.- Metodología.-

En esta sección se describen los trabajos realizados distinguiendo entre los correspondientes a la toma de datos del láser escáner, trabajos de campo, y los correspondientes al procesamiento de los datos, trabajos de gabinete en los que a partir de los datos láser se generarán los modelos 3D, ortoimágenes, para acometer finalmente el análisis de las patologías.

10.3.1.- Trabajo de campo.-

Para preparar el levantamiento de la Catedral de Coria se realizaron las siguientes tareas: planificar la ubicación y el número de estacionamientos, y decidir la resolución óptima de escaneo para representar con detalle la Catedral. Definir previamente estos pasos permite maximizar la información recogida.

Las fases de escaneado de la Catedral fueron las siguientes:

- 1.- Planificar los distintos estacionamientos de láser escáner y el lugar de colocación de las dianas.
- 2.- Colocación alternativa de las 206 dianas (en grupos de tres) en el exterior e interior de la Catedral, con la finalidad de poder orientar los estacionamientos del láser escáner y posteriormente unirlos geoméricamente. Seis de estas dianas coinciden con puntos de la Red de Proximidad para poder dar coordenadas absolutas (UTM ETRS89) a todos los puntos del escaneado.
- 3.- Estacionamientos del láser escáner y sus posteriores escaneados. Cada vez que se estaciona el láser escáner debe orientarse a tres dianas para posteriormente poder enlazar geoméricamente los escaneados.
- 4.- Descarga de los datos en el ordenador para su posterior procesamiento con el programa Leica Cyclone 7.4.

10.3.2.- Procesamiento de datos.-

Lo que se pretende con el procesamiento de datos es obtener imágenes de la Catedral en la que se pueda medir. Primero se alinean todas las nubes de puntos para formar un bloque único y disponer del modelo de la Catedral en formato tridimensional. A continuación, se obtienen las secciones de aquellas partes de la Catedral que van a ser objeto de estudio. Las secciones se convierten en ortoimágenes y así éstas se pueden utilizar para obtener planos en 2D.

Después de la adquisición de datos se lleva a cabo el procesamiento, con las siguientes actividades:

- 1.- *Alineación de las nubes de puntos.* Mediante la metodología de resección de dianas, que consiste en escanear las mismas dianas desde dos posiciones distintas, para ello se han escaneado desde cada estación un mínimo de tres dianas.

La alineación se realiza mediante el método de modelos independientes de orientación. Como cada nube se expresa en su sistema local, al menos deben existir tres puntos homólogos entre nubes de puntos vecinas. Cada par consecutivo de nubes de puntos es orientado con tres dianas comunes, con el fin de proporcionar un conjunto de parámetros relativos de orientación. Estos parámetros se utilizan como solución inicial en un procedimiento de ajuste por bloque. La alineación de cada una de las nubes de puntos se basa en la solución de la transformación calculada. Con esta solución se produce la transformación 3D que da lugar a la siguiente ecuación (Mancera et al., 2010):

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -\Delta k & \Delta \varphi \\ \Delta k & 1 & -\Delta \omega \\ -\Delta \varphi & \Delta \omega & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

Donde (X', Y', Z') son las coordenadas en el nuevo marco, (X, Y, Z) son las coordenadas en el marco de entrada, (ΔX , ΔY , ΔZ) y (φ , k , ω) son los parámetros de la orientación relativa.

La alineación se perfeccionará mediante un proceso iterativo de ajuste por mínimos cuadrados con el fin de reducir el error.

Una vez resueltos estos pasos y alineadas las nubes de puntos, el programa informático Leica Cyclone 7.4 nos presenta los siguientes resultados de la alineación:

Status: VALID Registration
Mean Absolute Error:
for Enabled Constraints = 0.002 m (a)
Database name : Coria

Name (b)	ScanWorld(c)	ScanWorld(d)	Error(e)	Error Vector(f)	Horz(g)	Vert(h)
Extbajo	Station-001	Station-002	0.002 m	(0.000, -0.002, 0.000) m	0.002 m	0.000 m
Extrriba	Station-001	Station-002	0.002 m	(0.001, 0.000, 0.002) m	0.001 m	0.002 m
Tres	Station-001	Station-012	0.003 m	(0.001, -0.003, 0.000) m	0.003 m	0.000 m
Tres	Station-001	Station-013	0.002 m	(0.000, 0.000, 0.002) m	0.001 m	0.002 m
Tres	Station-001	Station-014	0.001 m	(0.000, -0.001, 0.001) m	0.001 m	0.001 m
Tres	Station-001	Station-052	0.002 m	(0.001, -0.002, 0.001) m	0.002 m	0.001 m
Dos	Station-001	Station-013	0.003 m	(-0.001, 0.002, -0.002) m	0.002 m	-0.002 m

Tabla 17.- Resultados alineación de las nubes de puntos.

De donde

- a: error medio de todos los estacionamientos.
- b: identificación de la diana.
- c: estacionamiento de partida.
- d: estacionamiento siguiente.
- e: error total del estacionamiento.
- f: vector del error.
- g: error horizontal.
- h: error vertical.

ScanWorld Transformations
Station-001: SW-001 (Leveled) (a)
translation: (0.000, 0.000, 0.000) m(b)
rotation: (0.0000, 1.0000, 0.0000):0.000 deg(c)
Station-002: SW-001 (Leveled)(a)
translation: (-10.419, -22.435, 1.009) m (b)
rotation: (0.0000, 0.0000, 1.0000):-179.190 deg (c)
Station-004: SW-001 (Leveled) (a)
translation: (-43.250, -24.040, 3.712) m (b)
rotation: (0.0000, 0.0000, 1.0000):-178.270 deg (c)

Tabla 18.- Parámetros de transformación de la alineación de nubes de puntos.

De donde

- a: n° de estacionamiento.
- b: parámetros de traslación.
- c: parámetros de rotación.

En la tabla número 18 se puede apreciar que el estacionamiento “Station-001” es el origen y punto de referencia y, por lo tanto, sus parámetros de rotación y traslación son nulos. Sin embargo, en el estacionamiento número 2 ya aparecen los parámetros correspondientes.

Vertices: visible = 206 total = 206 (a)
Point Clouds: visible = 96 total = 96 (b)
points: visible = 1798603675 total = 1798603675 (c)
Registered Scans:

Scan-0001.bin (10974731 points, 2946x7854) (2946 x 7854 points) (*d*)
uno (201 x 201 points) (*e*)
dos (201 x 201 points) (*e*)
tres (201 x 201 points) (*e*)
extrriba (201 x 201 points) (*e*)
extbajo (201 x 201 points) (*e*)
Scan-0001.bin (10686584 points, 2946x7854) (2946 x 7854 points) (*d*)
uno (201 x 201 points) (*e*)
extbajo (201 x 201 points) (*e*)
extrriba (201 x 201 points) (*e*)
porton (201 x 201 points) (*e*)
portonlejos (201 x 201 points) (*e*)

Tabla 19.- Características de las nubes de puntos.

De donde:

a: nº total de dianas.

b: nº total de nubes de puntos.

c: nº total de puntos escaneados.

d: nº total de puntos escaneados desde ese estacionamiento.

e: resolución de las dianas.

Como consecuencia de la alineación de las nubes de puntos ya se puede visualizar la nube completa (Figura 89).

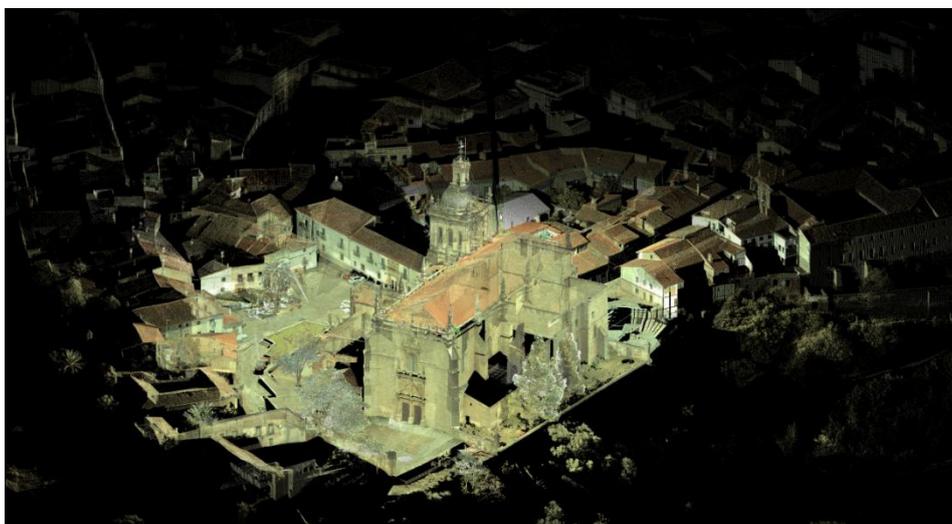


Figura 89.- Nube de puntos completa sin limpiar.

2.- Limpieza y segmentación.

Se eliminan todos los puntos que no se requieren para el trabajo, es decir, se elimina el ruido. Se entiende por ruido todo aquello que molesta y no es necesario para crear la imagen tridimensional de la Catedral. El ruido se ha introducido a causa del viento, superficies de reflexión malas, el Sol, etc (Figura 90).

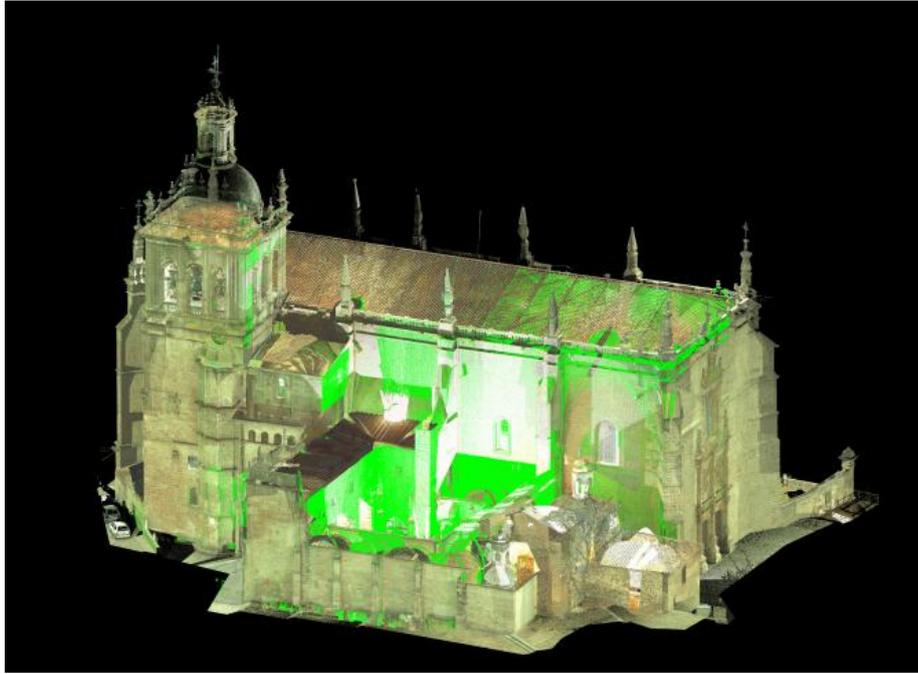


Figura 90.- Nube de puntos completa y limpia.

Si se comparan las figuras 89 y 90 se observa que en ésta última la imagen aparece completamente limpia de todos aquellos puntos que no eran necesarios.

3.- *Preparación del modelo y secciones.* Una vez limpia la nube de puntos, se preparan las secciones para sacar las ortofotografías (Figuras 91, 92 y 93). El procedimiento es el siguiente:

1. Se corta el modelo tridimensional de la Catedral por la zona de la cual se quiere obtener la sección.
2. Obtenida la sección, se le cambia el sistema de referencia a uno local (temporal) con la finalidad de poder obtener las secciones con el frente deseado (perpendicular a la vista de pantalla).
3. Finalmente, obtención de la ortofoto.

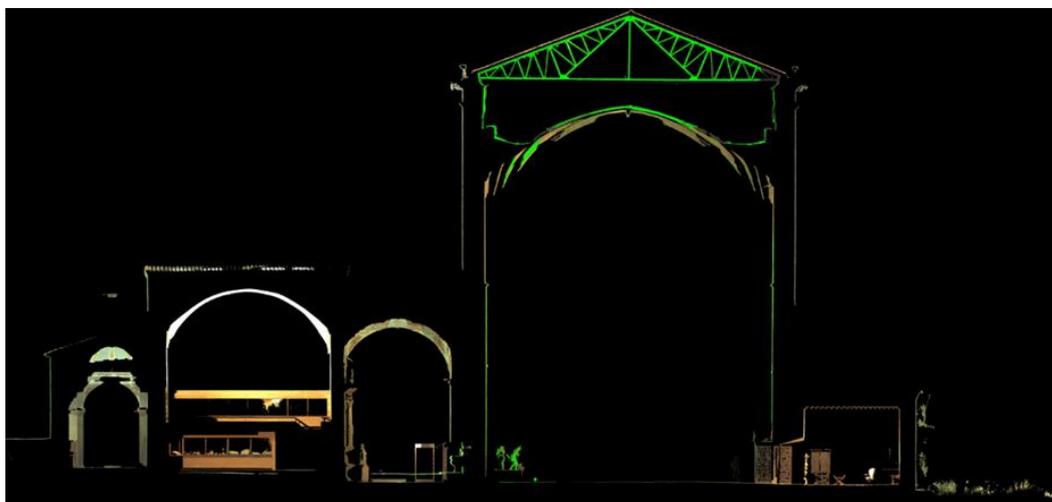


Figura 91.- Sección de la cercha número 3 en RGB.

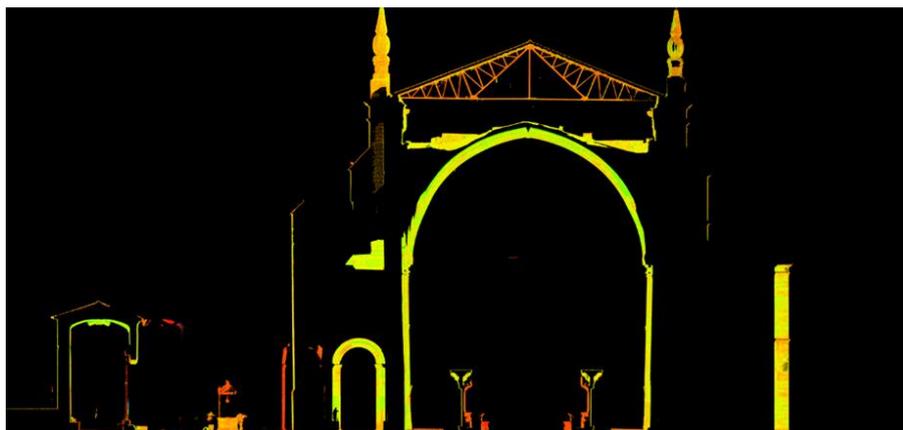


Figura 92.- Sección por el centro de bóveda número 4 en intensidad.

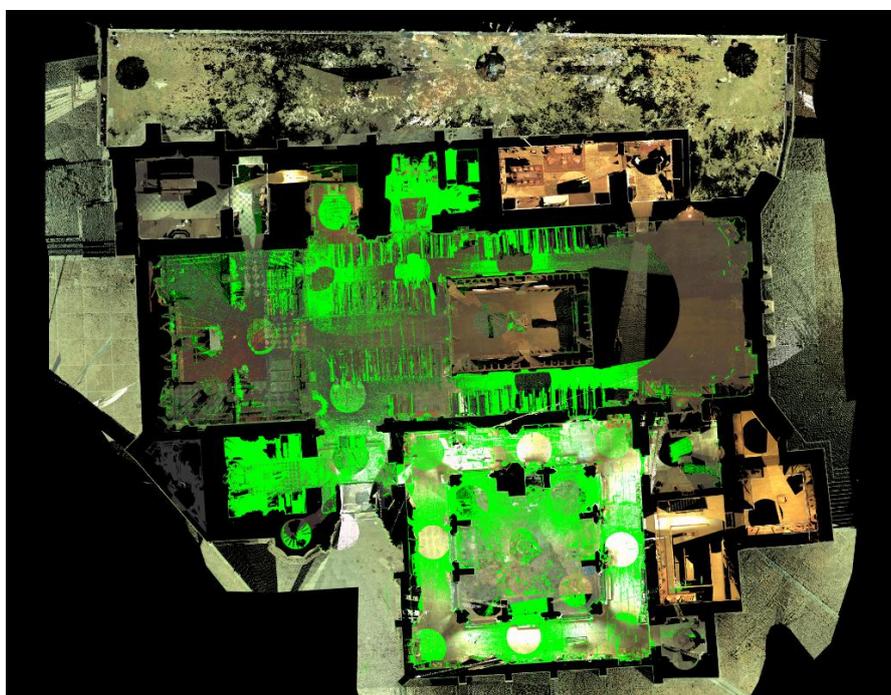


Figura 93.- Sección de la planta en color verdadero (1 metro).

10.3.3.- Obtención de ortoimágenes.-

Las ortoimágenes combinan la calidad métrica con el detalle fotográfico, siendo muy útiles para poder evaluar información cualitativa como colores, materiales o texturas. Todo ello hace que sean productos altamente demandados (Rodríguez-González et al., 2012). Se han generado ortoimágenes a partir de las diferentes secciones generadas.

Para la generación de ortoimágenes se emplea el método indirecto, también conocido como rectificación diferencial, donde se asigna a cada píxel del plano de la ortoimagen (de coordenadas X,Y), el valor de sus coordenadas 3D (X,Y,Z). En consecuencia, cada punto en el espacio puede ser proyectado sobre el plano imagen mediante la ecuación de colinealidad, obteniendo sus coordenadas imagen (x,y) (Rodríguez-González et al., 2012). Siendo las ecuaciones de colinealidad:

$$x = x_{pp} - f \cdot \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$$y = y_{pp} - f \cdot \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

10.3.4.- Georreferenciación.-

Por último, todo el conjunto puede estar georreferenciado al sistema ETRS89. Así, es factible integrar, de una manera sencilla, cartografía y datos del láser escáner. Para conseguir la georreferenciación se hizo coincidir la situación de seis dianas con seis bases de la red de Proximidad del sistema GPS. Con las coordenadas de estas bases y el modelo de ondulación del geoide EGM08, se aplica el modelo Badekas-Molodensky para transformar las coordenadas locales del bloque en coordenadas ETRS89 (Mancera et al., 2010):

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 + d\lambda & \varepsilon_Z & -\varepsilon_Y \\ -\varepsilon_Z & 1 + d\lambda & \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y & -\varepsilon_X & 1 + d\lambda \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X & -X_c \\ Y & -Y_c \\ Z & -Z_c \end{bmatrix}$$

donde $d\lambda$ es la variación de la escala, $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ son las traslaciones y (X_c, Y_c, Z_c) son las coordenadas del centroide que es el origen de las rotaciones.

De esta manera queda el modelo tridimensional de la Catedral georreferenciado.

Una vez efectuada la transformación, el programa informático Leica Cyclone 7.4 nos presenta los siguientes resultados:

Status: VALID Registration

Mean Absolute Error:

for Enabled Constraints = 0.015 m (a)

Name(b)	ScanWorld(c)	ScanWorld(d)	Error(e)	Error Vector(f)	Horz(g)	Vert(h)
Dos	Coria_Emi.txt	Station-001	0.014 m	(0.001, 0.009, -0.011) m	0.009 m	-0.011 m
Dos	Coria_Emi.txt	Station-013	0.016 m	(0.004, 0.007, -0.014) m	0.008 m	-0.014 m
Dos	Coria_Emi.txt	Station-014	0.015 m	(0.004, 0.008, -0.013) m	0.009 m	-0.013 m
Dos	Coria_Emi.txt	Station-052	0.016 m	(0.004, 0.010, -0.012) m	0.011 m	-0.012 m
Tres	Coria_Emi.txt	Station-001	0.017 m	(-0.002, -0.001, 0.017) m	0.002 m	0.017 m
Tres	Coria_Emi.txt	Station-012	0.018 m	(-0.005, -0.001, 0.017) m	0.005 m	0.017 m

Tabla 20.- Resultados de la transformación de coordenadas.

De donde:

a: error medio de todas los estacionamientos.

b: identificación de la diana.

c: estacionamiento de partida.

d: estacionamiento siguiente.

e: error total del estacionamiento.

f: vector del error.

g: error horizontal.

h: error vertical.

Si se compara la tabla 20 con la tabla 17 se observa que la georreferenciación del bloque conlleva un aumento del error. En coordenadas locales el error medio es de 2 mm, sin embargo en coordenadas UTM ETRS89 el error medio es de 15 mm. Por lo tanto, para la obtención de ortofotos no se utiliza el bloque georreferenciado por coordenadas locales.

10.4.- Resultados.-

10.4.1.- Ortofotos.-

La Ortofotografía es una imagen proyectada al infinito, la cual conserva las medidas reales.

Tanto las nubes de puntos como las ortofotografías se pueden representar de las siguientes maneras:

- Escala de grises (Figura 94).
- Color de intensidad: en función de la reflectividad del material (Figura 95).
- Color verdadero: superposición de la imagen digital obtenida por la cámara del láser escáner con la nube de puntos (Figura 96).



Figura 94.- Ortofotografía en escala de grises.

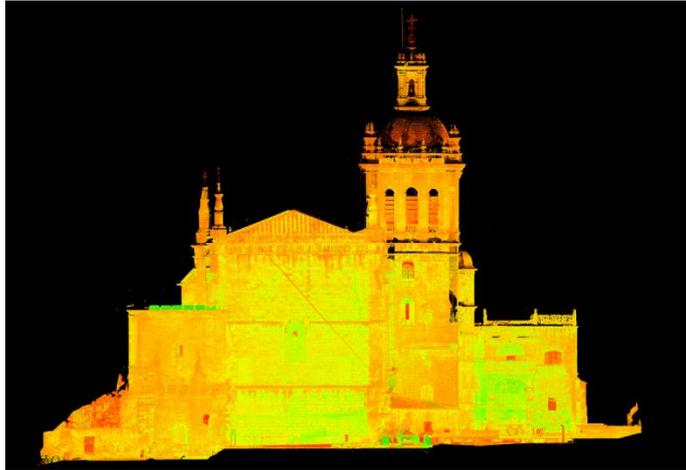


Figura 95.- Ortofotografía en color de intensidad.

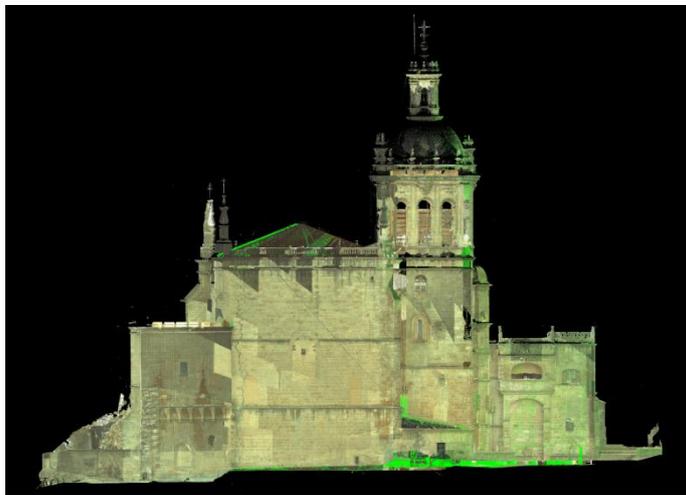


Figura 96.- Ortofotografía en color verdadero.

Obtenidas las ortofotografías, éstas se pasan a plano 2D mediante su dibujo en un programa CAD, en este caso Autocad (Figura 97).

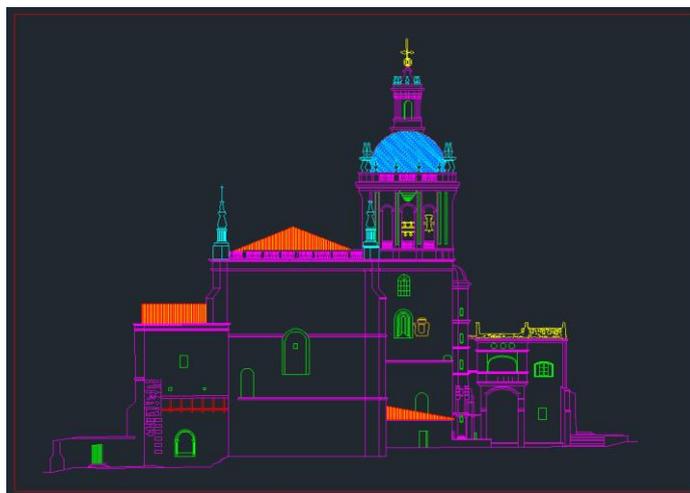


Figura 97.- Dibujo en 2D en Autocad a partir de una ortofoto.

De esta manera se podrá representar en planos las dimensiones reales de la catedral y llevar a cabo estudios geométricos.

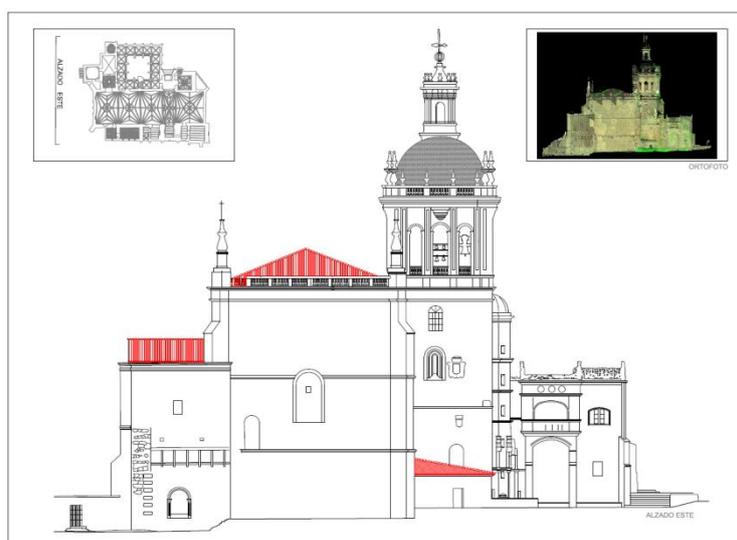


Figura 98.- Plano de una sección de la Catedral.

10.4.2.- Identificación de grietas.-

Obtenido el modelado tridimensional, se observa toda la Catedral para localizar las posibles grietas existentes. Una vez localizadas se extraen las secciones de su ubicación y éstas se transforman en ortofotos. A continuación, se presentan las localizaciones de las grietas en las ortofotos y el estudio de sus dimensiones.

Grietas fachada este de la Catedral (Figura 99)

Grieta nº 1.-

Situada en la parte inferior izquierda de la fachada este de la Catedral con una longitud de 6,437 m y una anchura máxima de 8,2 cm.

Grieta nº 2.-

Situada en la parte izquierda de la fachada este de la Catedral con una longitud de 24,322 m y una anchura máxima es de 10,1 cm.

Grieta nº 3.-

Situada en la parte superior central de la fachada este de la Catedral con una longitud de 8,066 m y una anchura máxima es de 4,8 cm.

Grieta nº 4.-

Situada en la parte superior derecha de la fachada este de la Catedral con una longitud de 14,235 m y una anchura máxima es de 8,8 cm.

Grieta nº 5.-

Situada en la parte inferior derecha de la fachada este de la Catedral con una longitud de 9,219 m y una anchura máxima de 6,2 cm.



Figura 99.- Grietas de la fachada este de la Catedral.

Grietas de las bóvedas (Figura 100)

Grieta nº 6.-

Situada en la bóveda junto a la cara oeste (bóveda 5). La longitud es de 0,709 m y la anchura máxima es de 2,2 cm.

Grieta nº 7.-

Bóveda número 4. La longitud es de 2,04 m y la anchura máxima es de 2,5 cm.

Grieta nº 8.-

Bóveda número 4. La longitud es de 2,116 m y la anchura máxima es de 1,2 cm.

Grieta nº 9.-

Bóveda número 4. La longitud es de 1,406 m y la anchura máxima es de 2,4 cm.

Grieta nº 10.-

Bóveda número 4. La longitud es de 1,445 m y la anchura máxima es de 2,1 cm.

Grieta nº 11.-

Bóveda número 4. La longitud es de 1,118 m y la anchura máxima es de 1,1 cm.

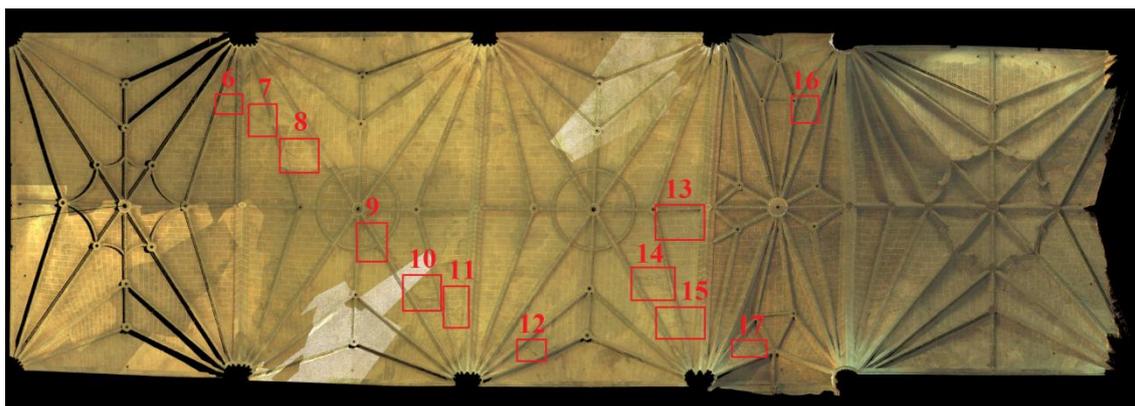


Figura 100.- Grietas de las bóvedas de la Catedral.

Grieta nº 12.-

Bóveda número 3. La longitud es de 0,785 m y la anchura máxima es de 5,8 cm.

Grieta nº 13.-

Bóveda número 3. La longitud es de 2,381 m y la anchura máxima es de 1,6 cm.

Grieta nº 14.-

Bóveda número 3. La longitud es de 1,894 m y la anchura máxima es de 3,2 cm.

Grieta nº 15.-

Bóveda número 3. La longitud es de 0,725 m y la anchura máxima es de 2,6 cm.

Grieta nº 16.-

Bóveda número 2. La longitud es de 1,242 m y la anchura máxima es de 2,2 cm.

Grieta nº 17.-

Bóveda número 2. La longitud es de 1,442 m y la anchura máxima es de 2,9 cm.

Grietas del interior de la Catedral (Figuras 101 y 102)

Grieta nº 18.-

Situada en la parte izquierda, bóveda 1, de la cara sur de la Catedral. Junto al retablo. La longitud de ésta es 3,929 m y la anchura máxima es de 9,9 cm.

Grieta nº 19.-

Situada en la parte central, bóveda 1, de la cara sur de la Catedral. Junto al retablo. La longitud de ésta es 4,251 m y la anchura máxima es de 7,8 cm.

Grieta nº 20.-

Situada en la parte derecha, bóveda 1, de la cara sur de la Catedral. Junto al retablo. La longitud de ésta es 5,619 m y la anchura máxima es de 5,9 cm.

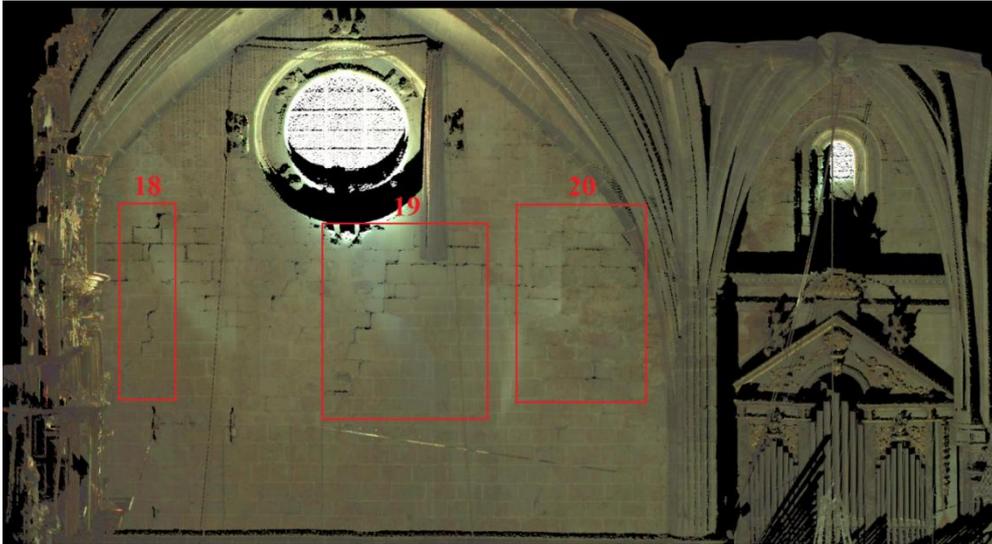


Figura 101.- Grietas en el interior de la Catedral.



Figura 102.- Grietas en el interior de la Catedral.

Grieta nº 21.-

Situada en la parte izquierda, bóveda 1, de la cara norte de la Catedral. Junto al retablo. La longitud de ésta es 3,347 m y la anchura máxima es de 4,6 cm.

Grieta nº 22.-

Situada en la parte izquierda, bóveda 1, de la cara norte de la Catedral. Junto al retablo. La longitud de ésta es 2,965 m y la anchura máxima es de 2,6 cm.

Grieta nº 23.-

Situada en la parte derecha, bóveda 1, de la cara norte de la Catedral. Junto al retablo. La longitud de ésta es 6,253 m y la anchura máxima es de 4,9 cm.

11.- Técnica termográfica.-

11.1.- Objetivos.-

Utilizando las termografías no es posible medir sobre ellas, cuantificar y ubicar con exactitud. Para subsanar este problema la tecnología del láser escáner es el complemento ideal para las tomas termográficas, puesto que combinadas ambas técnicas añade la información métrica que les falta a éstas.

El objetivo de este capítulo es conseguir una metodología que combine las termografías con las nubes de puntos obtenidas con el láser escáner. Para ello se realizan los siguientes pasos: primero, calibrar la cámara termográfica, segundo, unir la imagen termográfica a la nube de puntos y finalmente, obtener ortotermogramas.

11.2.- Equipo.-

La cámara termográfica empleada en esta tesis doctoral pertenece al grupo de investigación DIPAMAC, cuyo responsable es D. Luís Mariano del Río Pérez. El modelo de cámara termográfica es FLIR SC660, que mide la temperatura en un rango de -40 a 1500°C, con una resolución térmica de 0,03°C. La resolución IR es 640 x 480 píxeles y la espacial (IFOV) es de 0,65 mrad. El campo de visión (FOV) es de 24° en el plano horizontal y 18° en el plano vertical. El software utilizado para el tratamiento de las imágenes es el programa ThermaCAM Researcher Pro 2.10, y para la calibración de la cámara se utiliza el programa Photomodeler Pro v 6.4.

11.3.- Metodología.-

11.3.1.- Calibración métrica de la cámara termográfica.-

La cámara se calibra métricamente para determinar su modelo geométrico y éste viene descrito por sus parámetros de orientación interna.

Para obtener unos datos fiables, previamente la cámara termográfica debe estar calibrada con un cuerpo negro. La presente tesis muestra un modelo de calibración extraído del patrón del programa Photomodeler, se trata de una matriz plana y una solución de bajo coste para calibrar una cámara fotográfica. (Lagüela et al., 2011)

Se ha tomado como modelo el proporcionado por el programa Photomodeler (Figura 103). Este patrón se ha insertado en el programa Autocad 2012 para poder dibujar exactamente los puntos, que se encuentren a la misma distancia y poder captar el centro exacto de cada punto. A continuación, se ha impreso la plantilla, se ha pegado a un tablero y se ha taladrado cada punto para que el centro coincida con el centro de la bombilla. Consiste en un tablón de madera, con unas dimensiones de 40 cm x 60 cm, con 116 bombillas, elegido debido a su idoneidad para ser detectado por la cámara termográfica cuando se activa. Las bombillas se disponen en una matriz de 10 x 10, como muestra la figura 104.

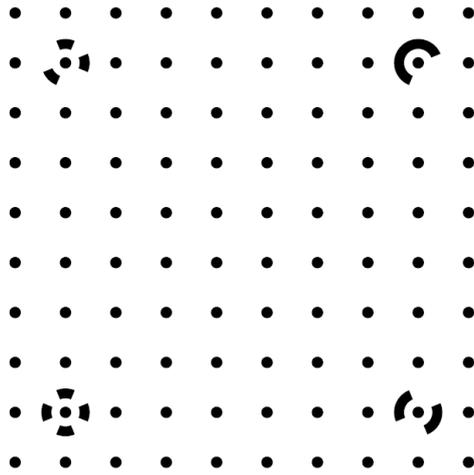


Figura 103.- Modelo de calibración de Photomodeler.

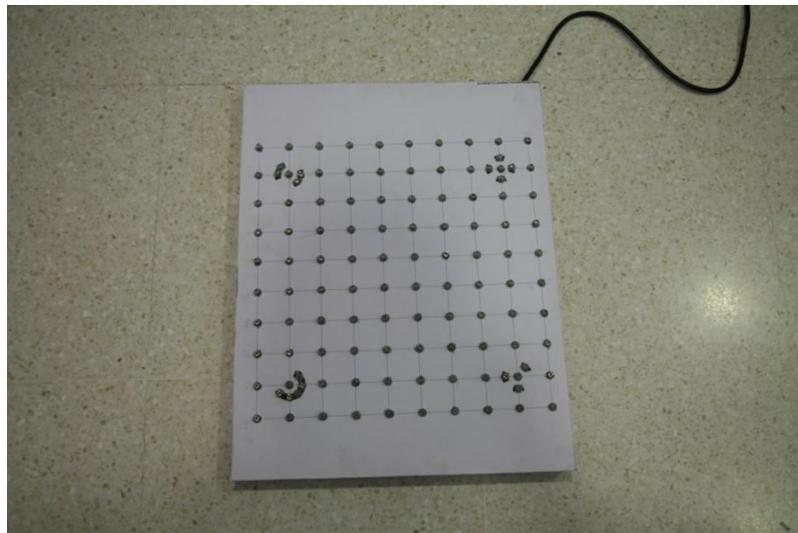


Figura 104.- Patrón de calibración.

El proceso de calibración de la cámara termográfica está hecho de forma manual, ya que Photomodeler no reconoce las bombillas.

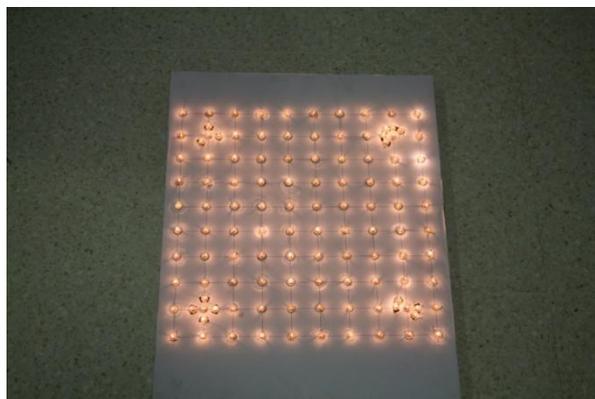


Figura 105.- Patrón de calibración adquiriendo temperatura.

El proceso de calibración se ha repetido cuatro veces, en cada uno de estos procesos se ha utilizado un campo y nivel diferentes y siempre la cámara ha estado enfocada. Las diferentes tomas de calibración se han realizado en zonas de interior y en condiciones de iluminación natural evitando así la radiación externa.

La calibración se ha realizado tomando imágenes desde cuatro posiciones diferentes, y desde cada posición colocando la cámara horizontal y vertical (Figura 106), resultando ocho imágenes termográficas en cada calibración.

Los resultados finales se obtienen de la media del procesado de los cuatro procedimientos.

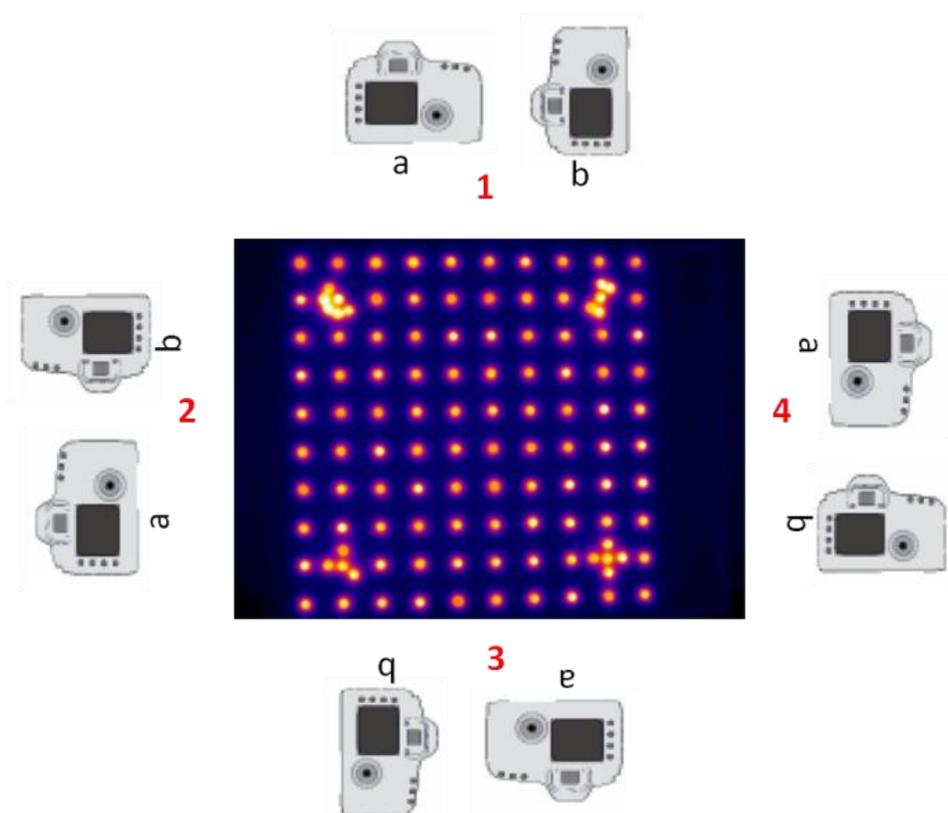


Figura 106.- Tomas de la cámara para la calibración.

Procedimiento de calibración n° 1 (Figura 107)

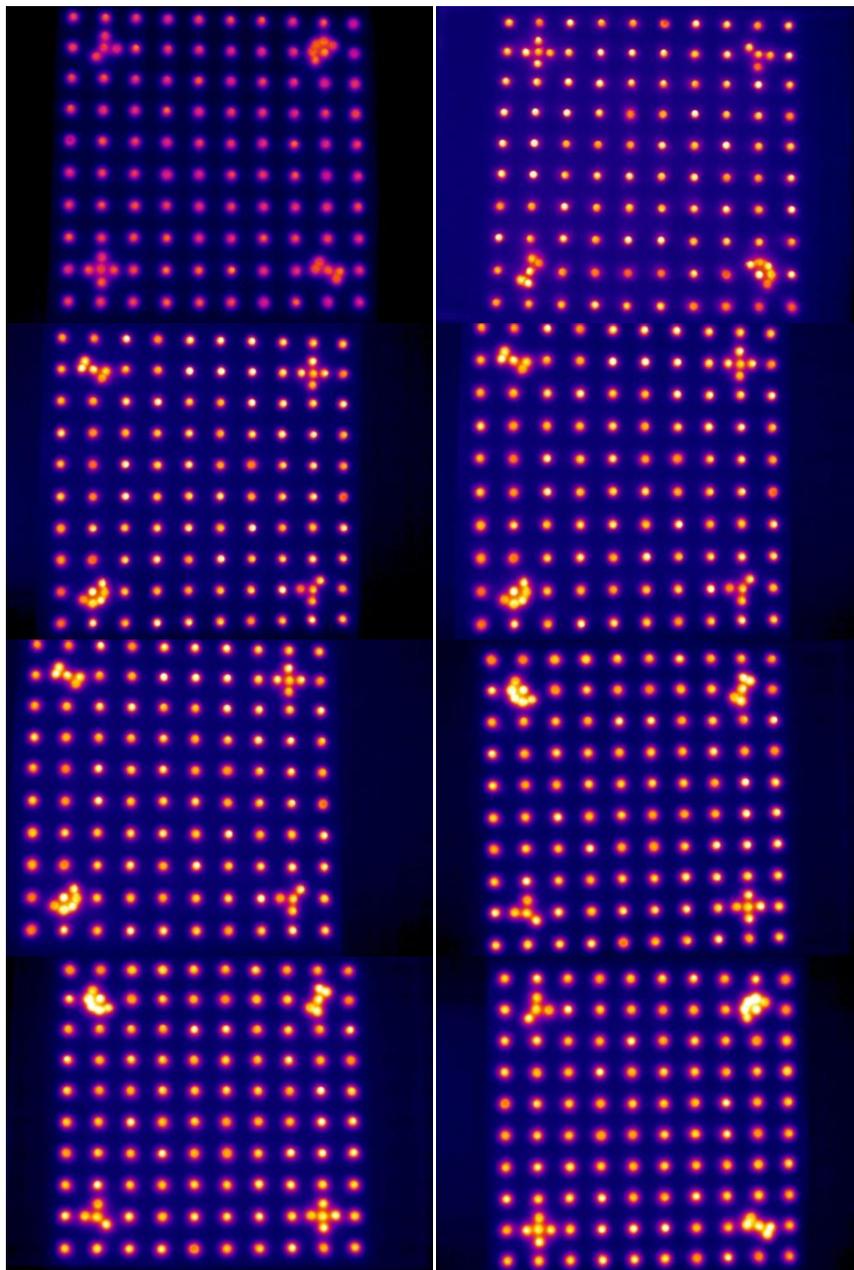


Figura 107.- Imágenes del procedimiento de calibración n° 1.

Resultados

Focal Length

Value: 42.898842 mm

Deviation: Focal: 0.325 mm

Xp - principal point x

Value: 7.995549 mm

Deviation: Xp: 0.095 mm

Yp - principal point y

Value: 5.308900 mm

Deviation: Yp: 0.108 mm

Fw - format width

Value: 15.820051 mm Deviation: Fw: 0.004 mm
Fh - format height
Value: 11.856000 mm
K1 - radial distortion 1
Value: 1.376e-004 Deviation: K1: 2.3e-005
K2 - radial distortion 2
Value: 4.404e-007 Deviation: K2: 2.1e-007
K3 - radial distortion 3
Value: 0.000e+000
P1 - decentering distortion 1
Value: 3.254e-005 Deviation: P1: 1.2e-005
P2 - decentering distortion 2
Value: 3.824e-005 Deviation: P2: 1.3e-005

Procedimiento de calibración nº 2 (Figura 108)

Resultados

Focal Length
Value: 42.945358 mm Deviation: Focal: 0.285 mm
Xp - principal point x
Value: 7.906006 mm Deviation: Xp: 0.063 mm
Yp - principal point y
Value: 5.186273 mm Deviation: Yp: 0.079 mm
Fw - format width
Value: 15.813019 mm Deviation: Fw: 0.002 mm
Fh - format height
Value: 11.856000 mm
K1 - radial distortion 1
Value: 1.397e-004 Deviation: K1: 1.4e-005
K2 - radial distortion 2
Value: 3.512e-007 Deviation: K2: 1.1e-007
K3 - radial distortion 3
Value: 0.000e+000
P1 - decentering distortion 1
Value: 2.264e-005 Deviation: P1: 6.2e-006
P2 - decentering distortion 2
Value: 5.686e-005 Deviation: P2: 1.1e-005

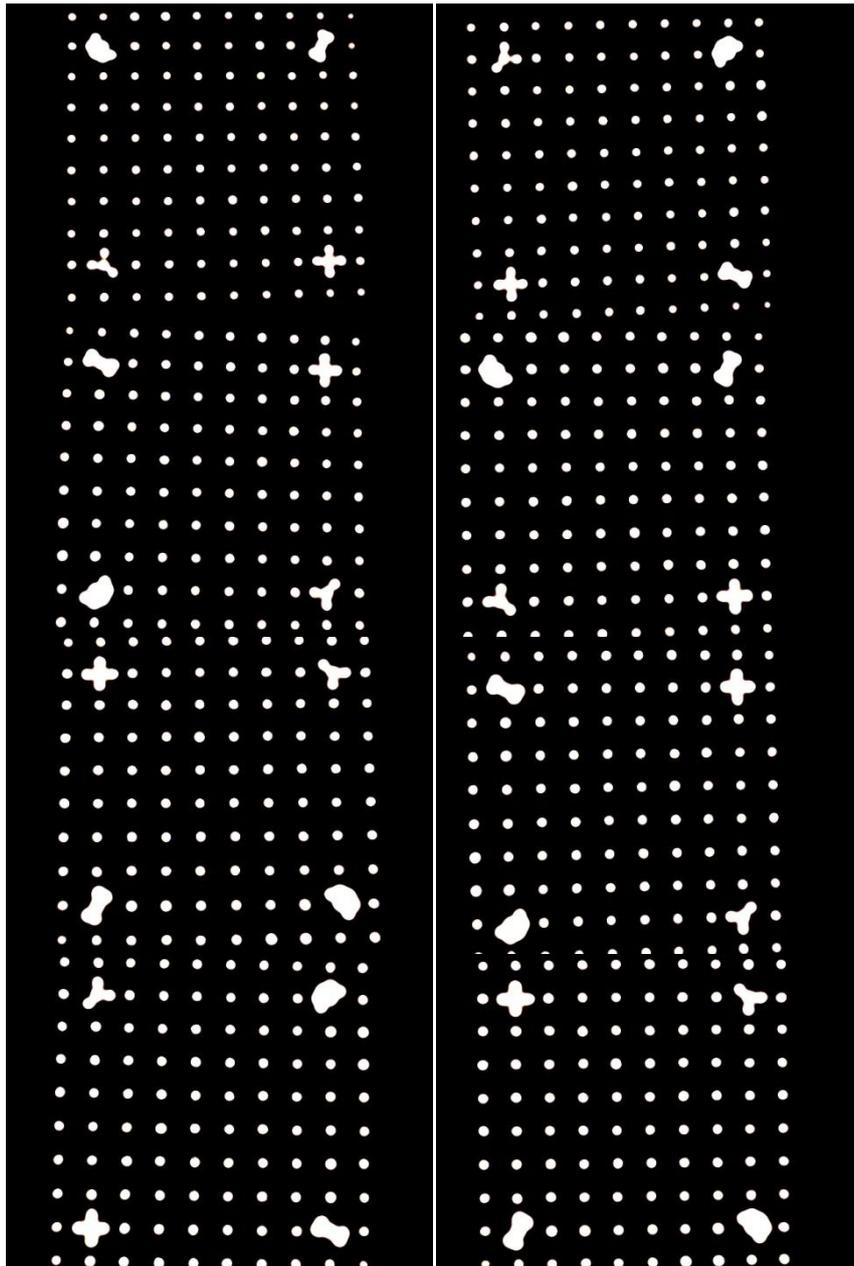


Figura 108.- Imágenes del procedimiento de calibración n° 2.

Procedimiento de calibración n° 3 (Figura 109)

Resultados

Focal Length	
Value: 38.907878 mm	Deviation: Focal: 0.294 mm
Xp - principal point x	
Value: 8.115408 mm	Deviation: Xp: 0.062 mm
Yp - principal point y	
Value: 6.047743 mm	Deviation: Yp: 0.127 mm
Fw - format width	
Value: 15.834447 mm	Deviation: Fw: 0.004 mm
Fh - format height	

Value: 11.856000 mm
K1 - radial distortion 1
Value: 1.508e-005 Deviation: K1: 2.0e-005
K2 - radial distortion 2
Value: 4.546e-007 Deviation: K2: 2.0e-007
K3 - radial distortion 3
Value: 0.000e+000
P1 - decentering distortion 1
Value: -2.191e-005 Deviation: P1: 1.3e-005
P2 - decentering distortion 2
Value: -3.144e-005 Deviation: P2: 1.8e-005

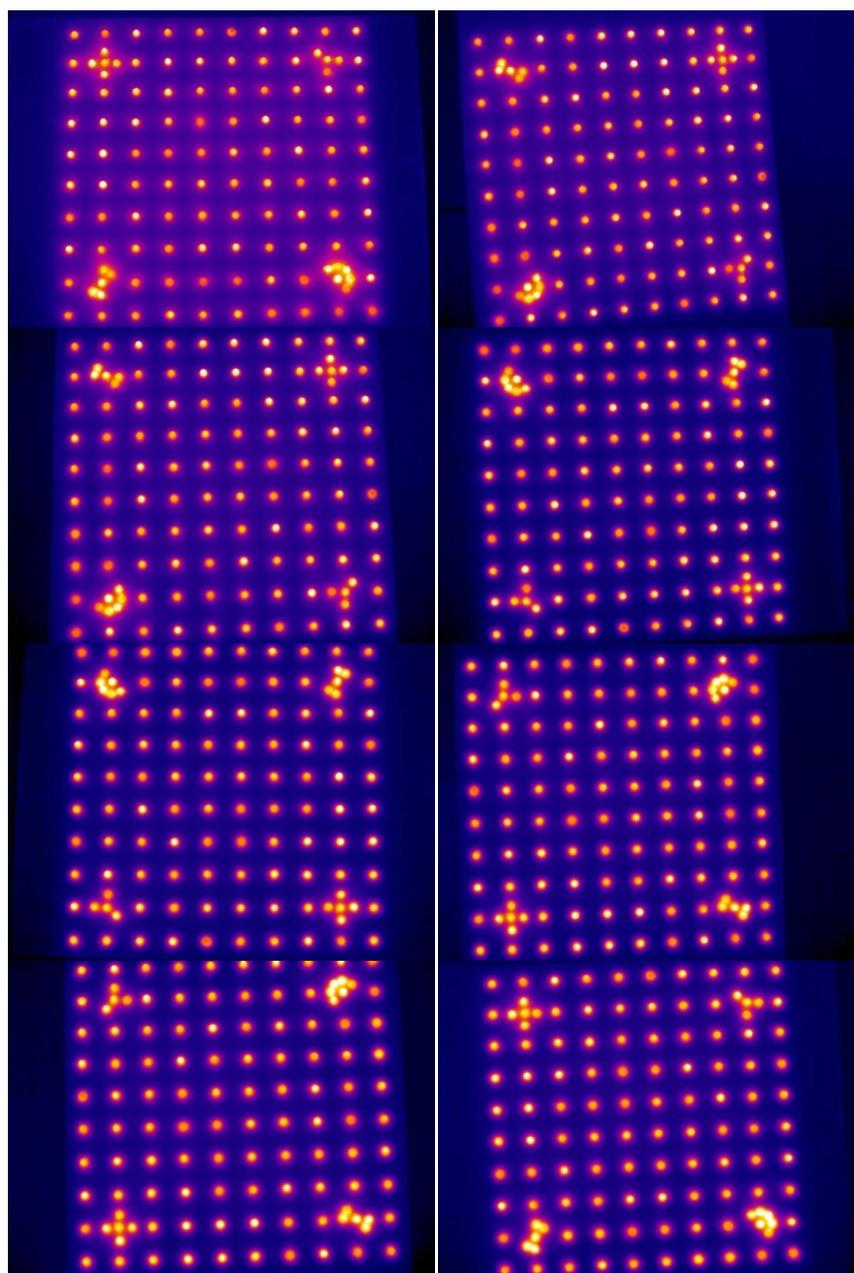


Figura 109.- Imágenes del procedimiento de calibración nº 3.

Procedimiento de calibración n° 4 (Figura 110)

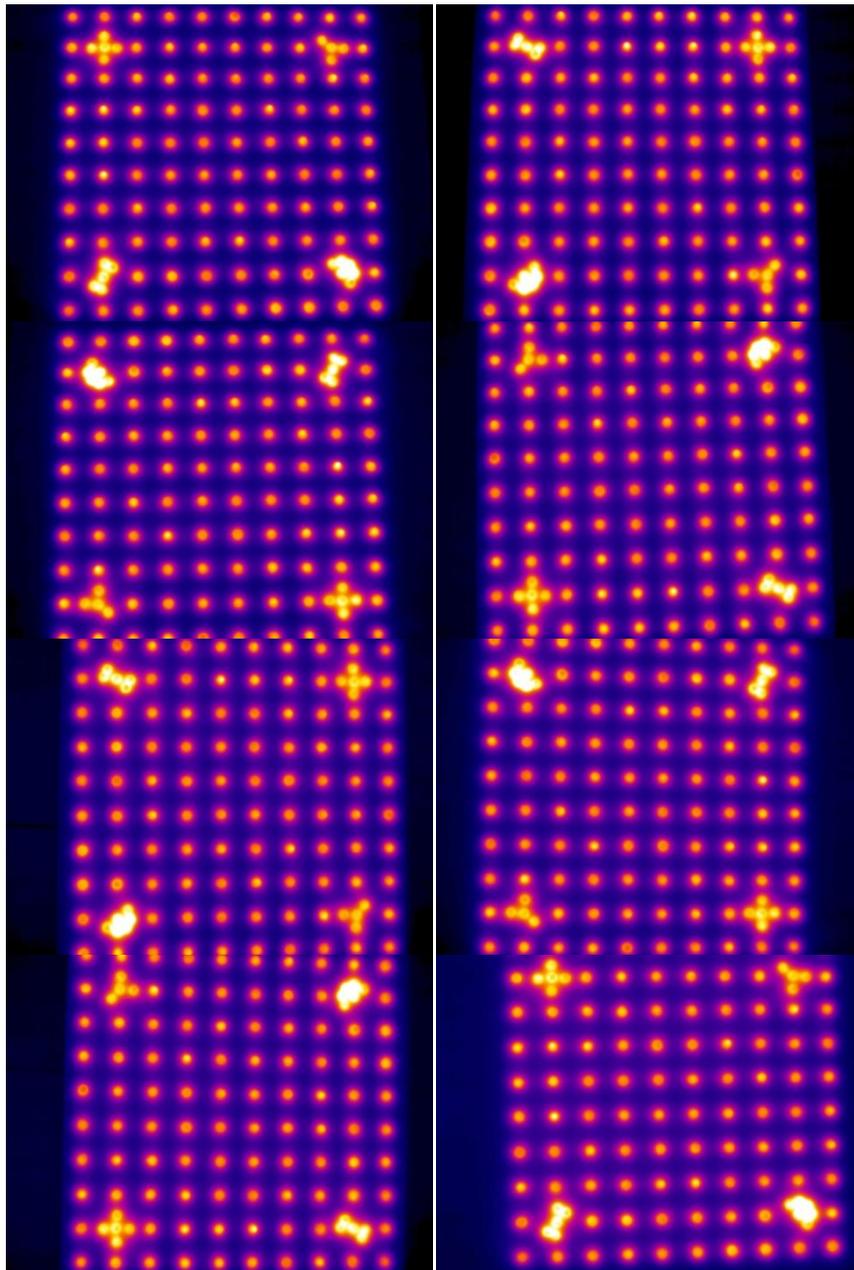


Figura 110.- Imágenes del procedimiento de calibración n° 4.

Resultados

Focal Length	
Value: 39.513147 mm	Deviation: Focal: 0.317 mm
Xp - principal point x	
Value: 7.798656 mm	Deviation: Xp: 0.085 mm
Yp - principal point y	
Value: 5.342540 mm	Deviation: Yp: 0.110 mm
Fw - format width	
Value: 15.788577 mm	Deviation: Fw: 0.004 mm
Fh - format height	
Value: 11.856000 mm	

K1 - radial distortion 1	
Value: 1.451e-004	Deviation: K1: 2.8e-005
K2 - radial distortion 2	
Value: 6.894e-007	Deviation: K2: 2.3e-007
K3 - radial distortion 3	
Value: 0.000e+000	
P1 - decentering distortion 1	
Value: -7.345e-005	Deviation: P1: 8.1e-006
P2 - decentering distortion 2	
Value: -2.478e-006	Deviation: P2: 1.8e-005

Resultados finales

Focal Length	
Value: 41.066306 mm	Deviation: Focal: 0.305 mm
Xp - principal point x	
Value: 7.953904 mm	Deviation: Xp: 0.076 mm
Yp - principal point y	
Value: 5.471364 mm	Deviation: Yp: 0.106 mm
Fw - format width	
Value: 15.814023 mm	Deviation: Fw: 0.0035 mm
Fh - format height	
Value: 11.856000 mm	
K1 - radial distortion 1	
Value: 1.09e-004	Deviation: K1: 2.1e-005
K2 - radial distortion 2	
Value: 4.839e-007	Deviation: K2: 1.8e-007
K3 - radial distortion 3	
Value: 0.000e+000	
P1 - decentering distortion 1	
Value: 3.254e-005	Deviation: P1: 1.5e-005
P2 - decentering distortion 2	
Value: 1.529e-005	Deviation: P2: 1.5e-005

11.3.2.- Trabajo termográfico.-

Para tomar las termografías hay que situarse a una distancia en la que se recoja exactamente la zona deseada, siempre teniendo en cuenta la focal de la cámara. Para poder formar, posteriormente, la imagen panorámica, todas las tomas han de realizarse desde la misma posición y sobre trípode y, finalmente, todas las tomas deben ser perpendiculares al muro y tener un solapamiento del 40% como mínimo. Es necesario de igual forma para evitar posibles desviaciones en los datos, tomar durante el trabajo de campo algunos datos puntuales de temperatura y humedad.

La cámara térmica utilizada, FLIR SC660, proporciona directamente la termografía obtenida en formato imagen (jpg). Se utiliza el programa ThermaCAM Researcher Pro 2.10 aplicando a la paleta de color, los conceptos de nivel y campo para dotar a las imágenes de significado. Las tonalidades más oscuras representan las temperaturas más bajas, y las tonalidades más cálidas representan temperaturas más altas (Figura 111).

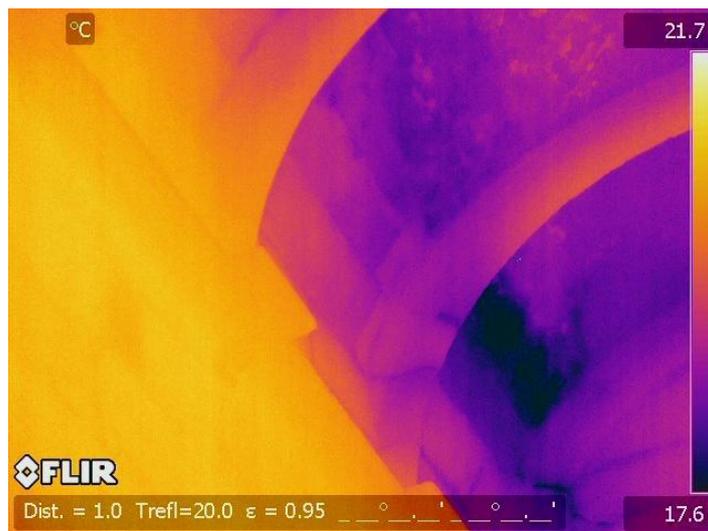


Figura 111.- Imagen mejorada con ThermaCAM Researcher Pro 2.10.

Dado que se trata de termografía cualitativa y no se hace necesario conocer las temperaturas exactas del objeto termografiado, no se han calculado ni la emisividad ni la temperatura reflejada.

De todas formas los parámetros aplicados son emisividad = 1 y distancia = 0, por tanto la temperatura reflejada ($\rho = 1 - \varepsilon$) y las condiciones atmosféricas quedan anuladas. Las zonas termografiadas son zonas con elevada emisividad acercándose mucho a la temperatura real y por tanto a una buena termografía.

De todas las termografías tomadas, solamente se han registrado humedades en la zona del archivo catedralicio, situado en la parte sur de la Catedral, aunque esto no quiere decir que no existan más humedades en otras zonas.

11.3.3.- Combinación de técnicas.-

Las termografías se importan al software Leica Cyclone 7.3, registrando cada termografía con el escaneo mediante el marcaje de puntos de control en la termografía y en la nube de puntos. El mínimo número de puntos necesarios para la correcta colocación de la termografía es 7, aunque la precisión aumenta proporcionalmente al número de puntos. Una vez que todas las termografías son registradas, la nube de puntos se texturiza con ellas, obteniéndose un modelo 3D termográfico (Lagüela et al., 2011).

11.4.- Resultados.-

11.4.1.- Modelos 3D termográficos.-

El estudio termográfico de la Catedral se circunscribe a la zona del archivo catedralicio, que es donde se han encontrado las humedades, y ésta se encuentra dividida en cuatro dependencias o salas.

Sala 1 (Sala del Archivo)

La termografía panorámica (Figura 113) está formada por 5 imágenes (Figura 112). Marcando 7 puntos de control que relacionan la composición de la sala 1 con la nube de puntos final formada por 29.912.164 puntos obtenemos un error de orientación de 1,24 píxeles. Este valor es aceptable ya que el tamaño de la imagen es de 193.370 píxeles.

La superficie de la humedad es de 0,326 m².

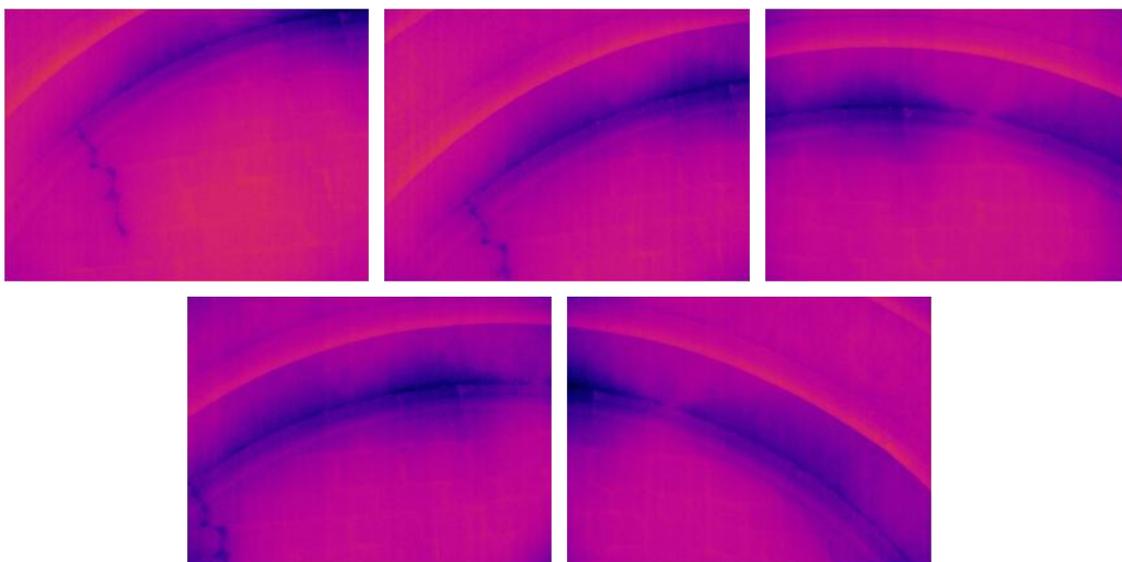


Figura 112.- Termografías preparadas para la composición de la sala 1.

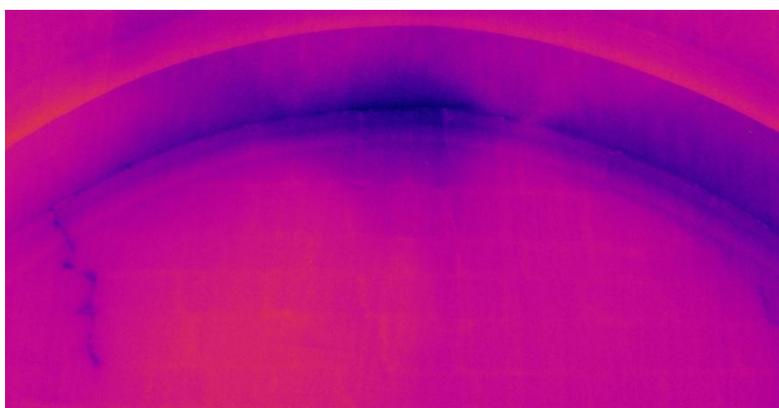


Figura 113.- Composición termográfica de la sala 1.

Sala 2 (Antesala del Archivo)

La termografía panorámica (Figura 115) está formada por 6 imágenes (Figura 114). Marcando 7 puntos de control que relacionan la composición de la sala 2 con la nube de puntos final formada por 29.774.089 puntos obtenemos un error de orientación de 0,98 píxeles. Este valor es aceptable ya que el tamaño de la imagen es de 187.210 píxeles.

La superficie de la humedad es de 1,266 m².

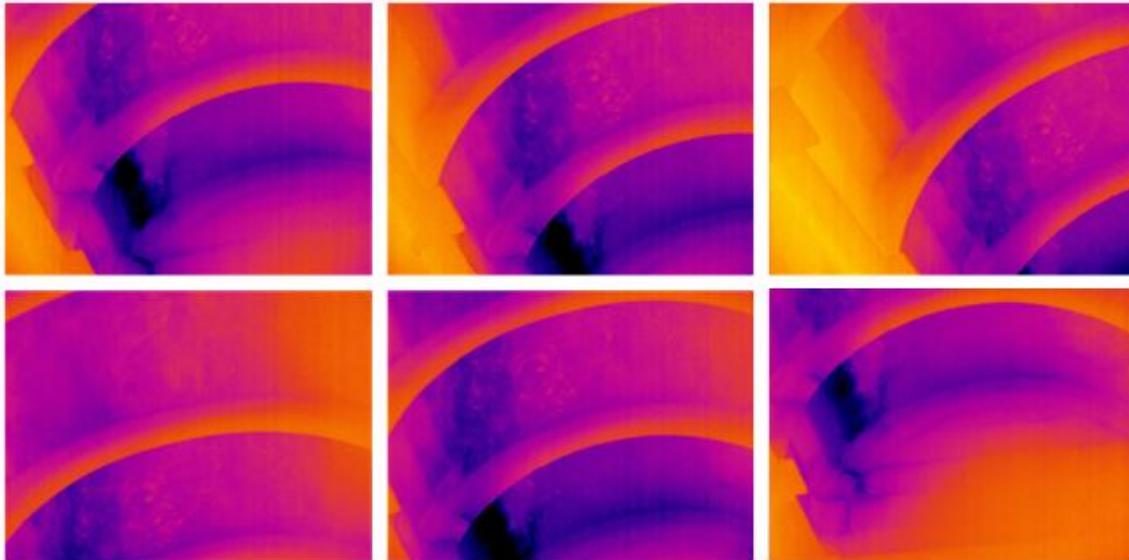


Figura 114.- Termografías preparadas para la composición de la sala 2.

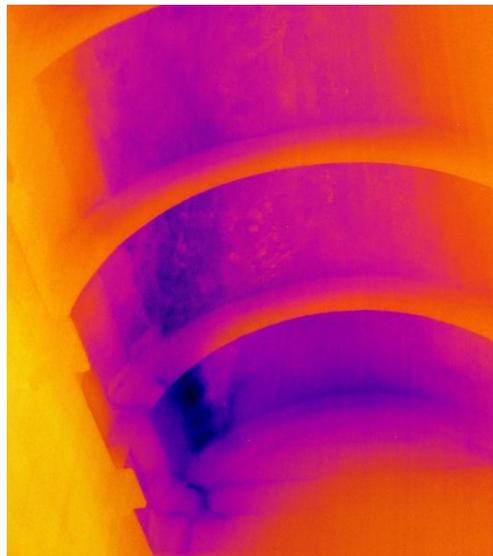


Figura 115.- Composición termográfica de la sala 2.

Sala 3 (Sala del órgano)

La termografía panorámica (Figura 117) está formada por 5 imágenes (Figura 116). Marcando 7 puntos de control que relacionan la composición de la sala 3 con la nube de puntos final formada por 29.326.951 puntos obtenemos un error de orientación de 1,32 píxeles. Este valor es aceptable ya que el tamaño de la imagen es de 183.063 píxeles.

La superficie de la humedad es de 2,479 m².

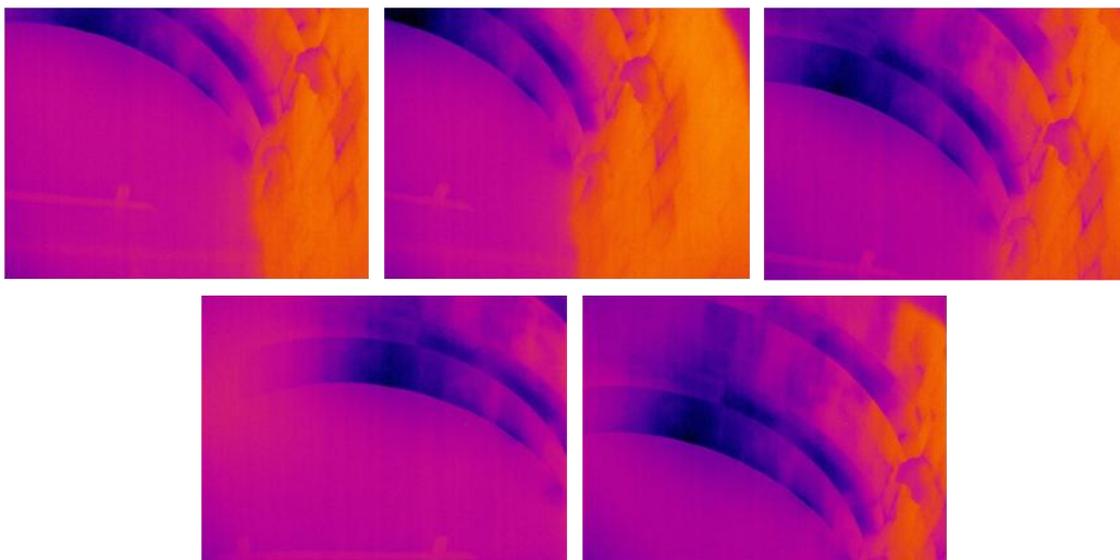


Figura 116.- Termografías preparadas para la composición de la sala 3.

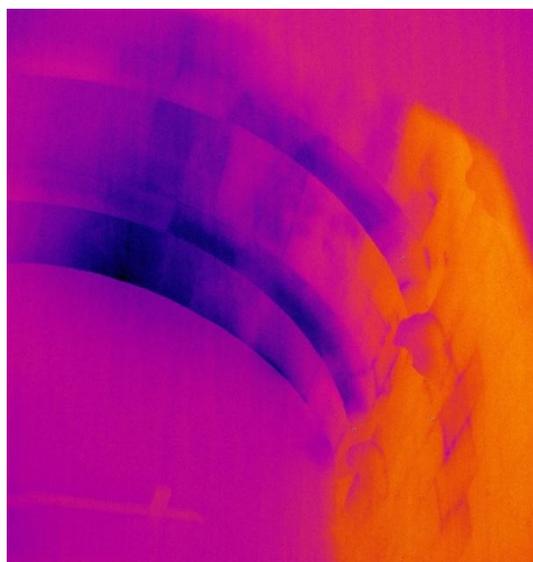


Figura 117.- Composición termográfica de la sala 3.

Sala 4 (Sala de entrada al cuerpo del archivo)

La termografía panorámica (Figura 119) está formada por 6 imágenes (Figura 118). Marcando 7 puntos de control que relacionan la composición de la sala 4 con la nube de puntos final formada por 28.869.254 puntos obtenemos un error de orientación de 1,26 píxeles. Este valor es aceptable ya que el tamaño de la imagen es de 139.650 píxeles.

La superficie de la humedad es de 0.326 m².

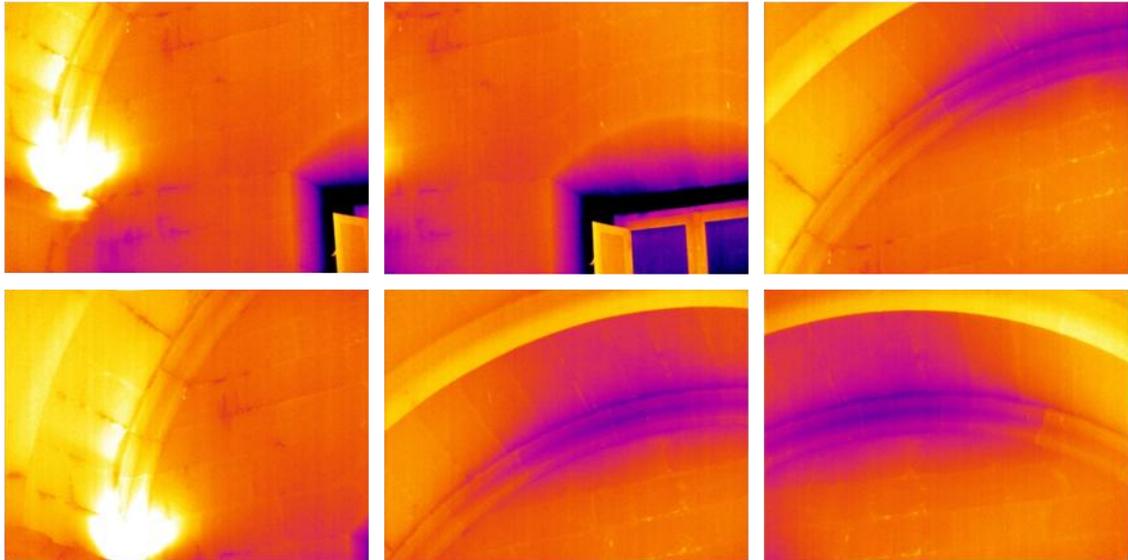


Figura 118.- Termografías preparadas para la composición de la sala 4.

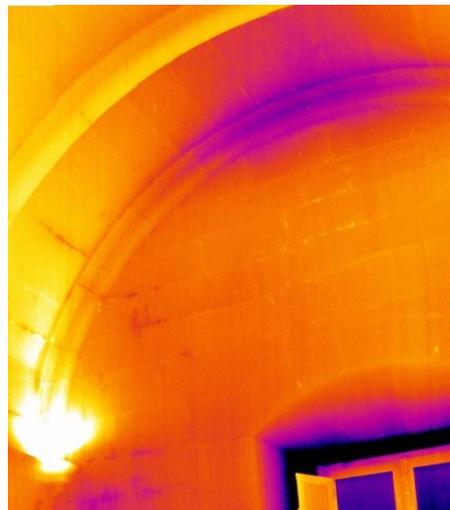


Figura 119.- Composición termográfica de la sala 4.

11.4.2.- Ortotermogramas.-

A la ortoimagen verdadera generada a partir de un modelo tridimensional realizado con técnicas de láser escáner y una imagen termográfica se le denomina ortotermograma. (Rodríguez-Gonzálvez et al., 2012).

Inicialmente se obtiene un modelo tridimensional de alta precisión obtenido con el láser escáner. Sobre el modelo 3D del láser escáner se superpone la imagen termográfica, resultando la fusión de ambos lo que se denomina una ortotermoimagen.

La ortotermoimagen es una imagen digital térmica transformada que muestra en proyección ortogonal la escena fotografiada. La transformación de una imagen fotográfica en ortotermoimagen supone el paso de una proyección en perspectiva a una proyección ortogonal. Este proceso se denomina rectificación diferencial. La rectificación diferencial elimina el desplazamiento de la imagen producido por la

inclinación de la imagen fotográfica y por el efecto orográfico de la superficie del terreno u objeto.

En la rectificación diferencial se asigna a cada píxel del plano de la ortotermoimagen (de coordenadas x,y) el valor de sus coordenadas 3D (X,Y,Z) . De este modo cada punto en el espacio puede ser proyectado sobre el plano imagen mediante la ecuación de colinealidad (1) (Rodríguez-Gonzálvez et al., 2012).

$$(1) \quad \begin{aligned} x &= x_{pp} - f \cdot \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ y &= y_{pp} - f \cdot \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned}$$

Puesto que se dispone de un modelo tridimensional de alta precisión, lo que se obtiene son ortotermoimágenes verdaderas, es decir, ortoimágenes en las que además se ha corregido el efecto relieve del objeto.

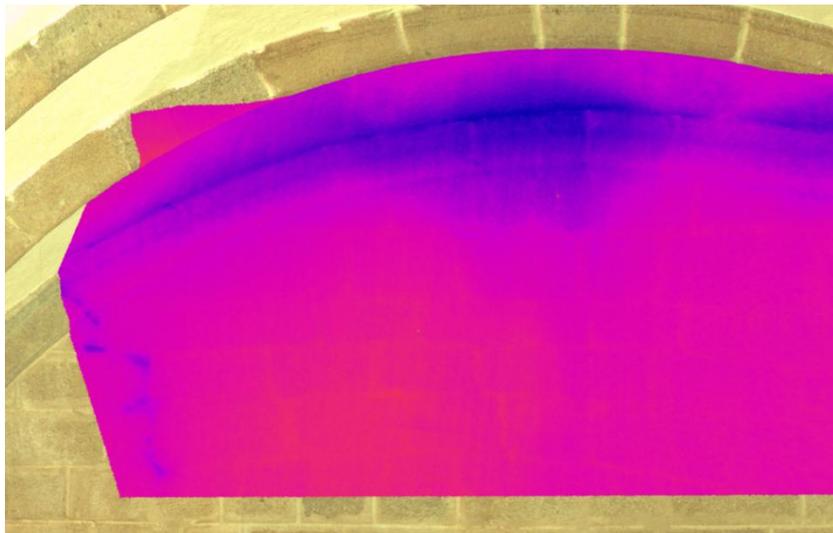


Figura 120.- Ortotermograma de la sala 1.

Datos del ortotermograma de la sala 1 (Figura 120)

Unit of measure	Meters
Units per pixel	0.00051480
X rotation	116.31043241
Y rotation	-0.000000000
Z rotation	171.67939006
X offset	2.89955536
Y offset	-1.21871053
Z offset	1.75852821

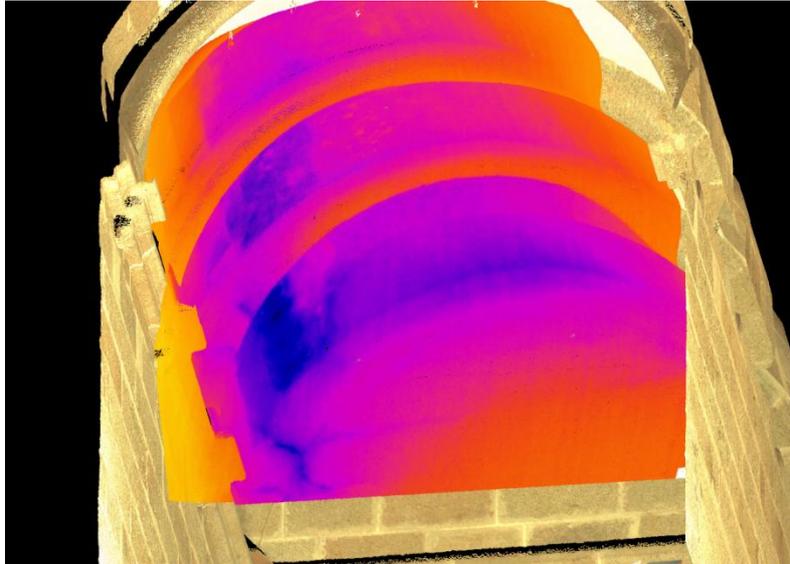


Figura 121.- Ortogramma termografico della sala 2.

Dati del ortogramma termografico della sala 2 (Figura 121)

Unit of measure	Meters
Units per pixel	0.00037718
X rotation	118.12055813
Y rotation	-0.00000000
Z rotation	-85.57865995
X offset	0.77205122
Y offset	2.39441376
Z offset	1.72946691

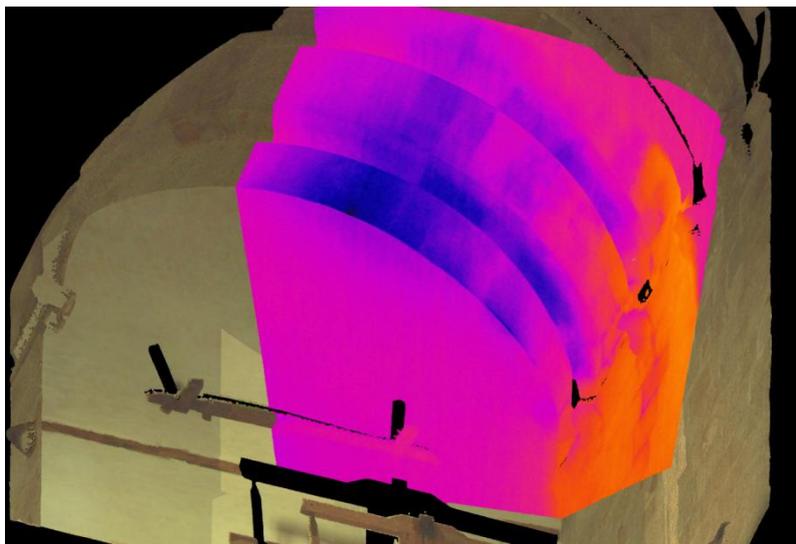


Figura 122.- Ortogramma termografico della sala 3.

Datos del ortotermograma de la sala 3(Figura 122)

Unit of measure	Meters
Units per pixel	0.00062375
X rotation	130.63437729
Y rotation	-0.00000000
Z rotation	0.00000000
X offset	-5.88672217
Y offset	1.90118764
Z offset	2.33382818

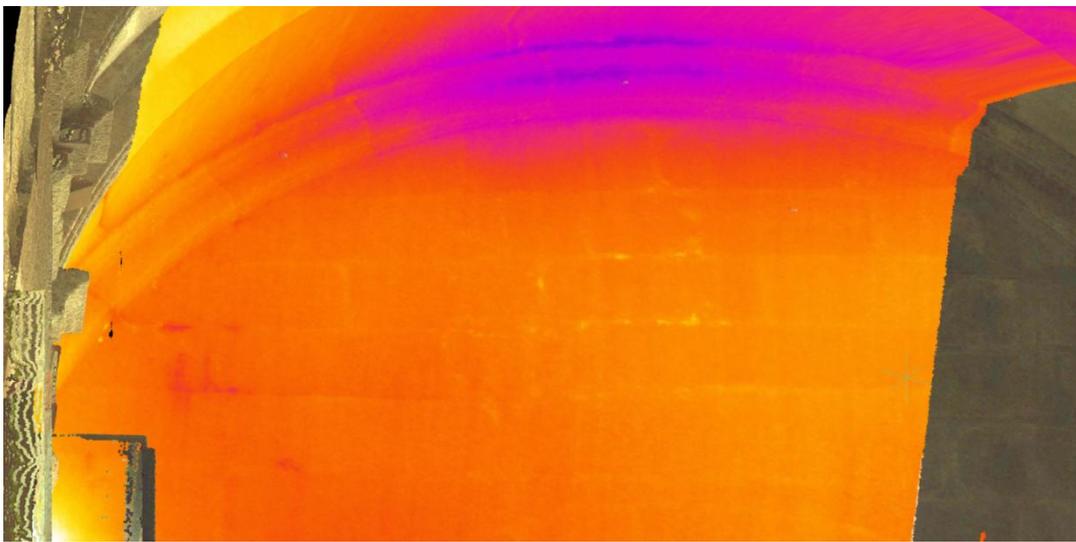


Figura 123.- Ortotermograma de la sala 4.

Datos del ortotermograma de la sala 4 (Figura 123)

Unit of measure	Meters
Units per pixel	0.00022951
X rotation	123.85013608
Y rotation	-0.00000000
Z rotation	-34.58541619
X offset	-0.20300303
Y offset	5.50829863
Z offset	2.01498223

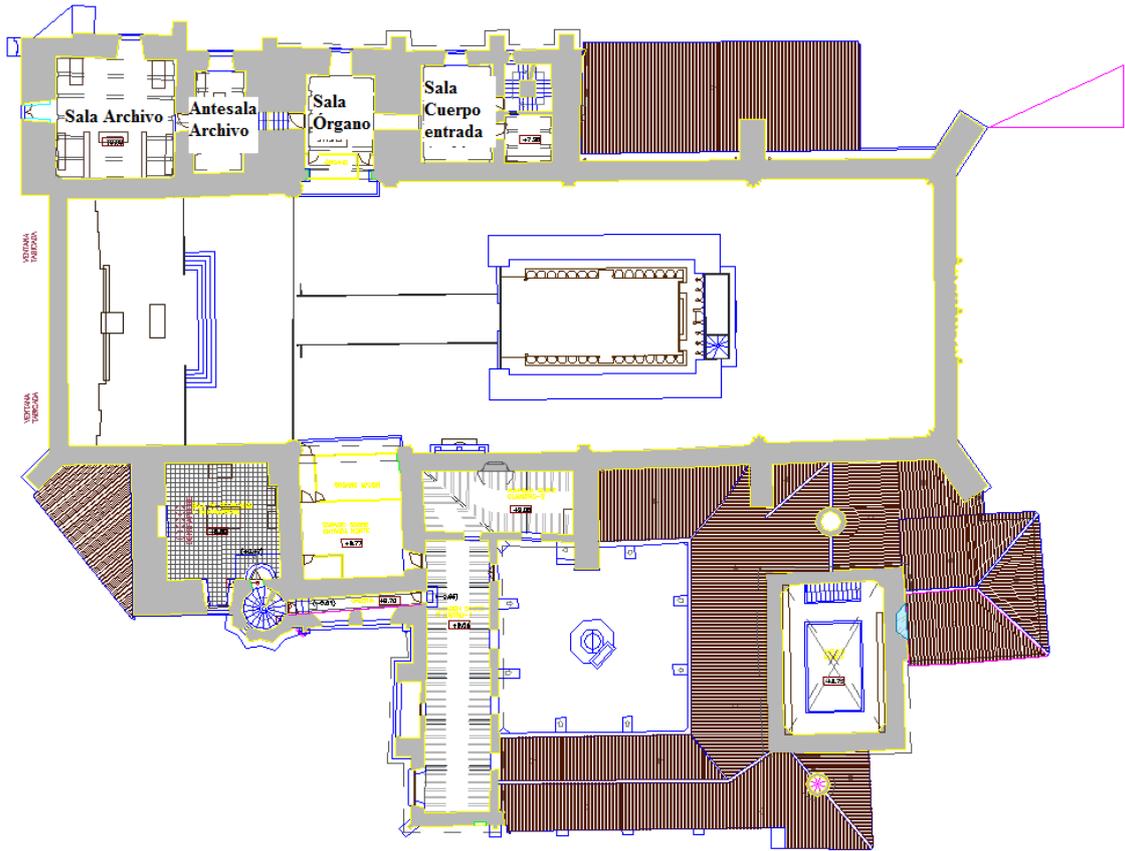


Figura 124.- Situación de las humedades en la planta de la Catedral.

12.- Programa informático para la detección de humedades.-

12.1.- Introducción.-

Se ha desarrollado un programa informático para la detección de humedades y visualización de isotermas en las imágenes infrarrojas. Es una aplicación implementada en lenguaje C++ utilizando la librería de procesos de imágenes digitales OpenCV 2.4. La bibliografía para documentar este programa ha sido (Manual OpenCV, 2013) (Bradski y Kaeler, 2008) (Otsu, 1979).

OpenCV (Open Source Computer Vision Library) es una librería de funciones en C y C++ que contiene un conjunto de utilidades de procesamiento de imágenes, visión artificial, captura de vídeo y visualización de imágenes. Es de código abierto, gratuita, multiplataforma (disponible para entornos MS Windows, Mac OS y Linux), rápida, de fácil uso y en continuo desarrollo. Páginas web de OpenCV:

<http://opencv.willowgarage.com/wiki> (Documentación en wiki)

<http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary> (Descargar librería)

<http://groups.yahoo.com/group/OpenCV> (Foro de discusión)

OpenCV fue desarrollada originalmente por Intel. Actualmente es un proyecto libre publicado bajo licencia BSD, lo que permite su uso tanto para aplicaciones comerciales como no comerciales.

OpenCV implementa una gran variedad de herramientas para la interpretación de la imagen. Es compatible con Intel Image Processing Library (IPL) que implementa algunas operaciones en imágenes digitales. OpenCV es principalmente una librería que implementa algoritmos para las técnicas de la calibración (Calibración de la Cámara), detección de rasgos para rastrear (Flujo Óptico), análisis de formas (Geometría, Contornos, etc), análisis del movimiento (Plantillas del Movimiento, Estimadores), reconstrucción 3D (Transformación de vistas), segmentación de objetos y reconocimiento (Histograma, etc.).

El rasgo esencial de la librería junto con funcionalidad y la calidad es su fácil manejo. Los algoritmos están basados en estructuras de datos muy flexibles, acoplados con estructuras IPL; más de la mitad de las funciones han sido optimizadas aprovechándose de la Arquitectura de Intel, aunque pueden ser utilizadas en cualquier otra arquitectura.

OpenCV en cuanto a análisis de movimiento y seguimiento de objetos, ofrece una funcionalidad interesante. Incorpora funciones básicas para modelar el fondo para su posterior sustracción, generar imágenes de movimiento MHI (Motion History Images) y para determinar dónde hubo movimiento y en qué dirección, algoritmos de flujo óptico, etc. Posee asimismo una interface gráfica llamada highGUI de muy altas prestaciones a la hora de desarrollar aplicaciones interactivas que requieran el concurso de un usuario.

12.2.- Descripción del funcionamiento del programa.-

Es una aplicación de manejo muy intuitivo, que se inicia capturando a partir de un archivo *.jpg una imagen IR en formato BGR, codificarla en niveles de gris y almacenarla en una estructura adecuada (Mat) para su proceso.

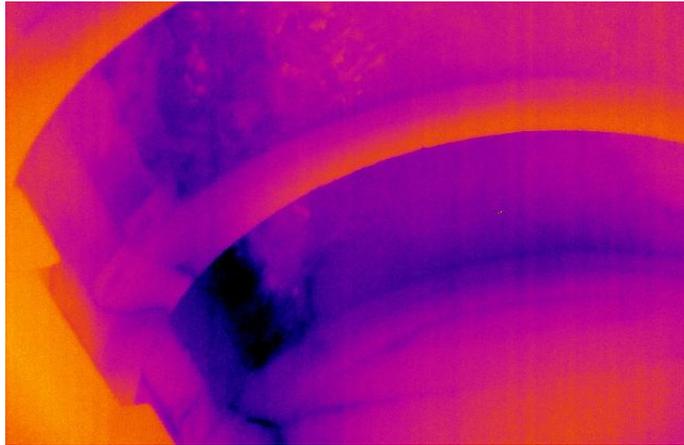


Figura 125.- Imagen original infrarroja (IR).

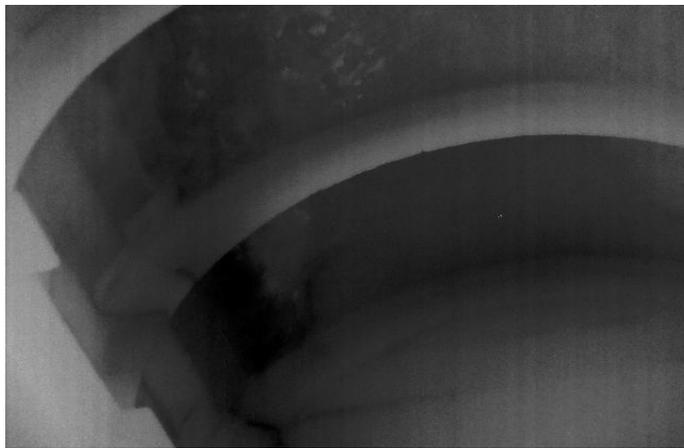


Figura 126.- Imagen original en escala de grises.

12.2.1.- Primer paso: división de la imagen.-

El primer paso del proceso supone hacer un estudio del reparto de colores (histograma) en la imagen BGR original, para lo cual se realiza una división de la imagen (Split) que devuelve los tres canales separados en el espacio de color RGB (Figuras 127, 128 y 19). Como es lógico, dada las características de la imagen original, la componente verde (G) tiene un peso casi despreciable. A partir de este punto se lanzó un bucle proceso interactivo con los pasos que se enumeran a continuación.

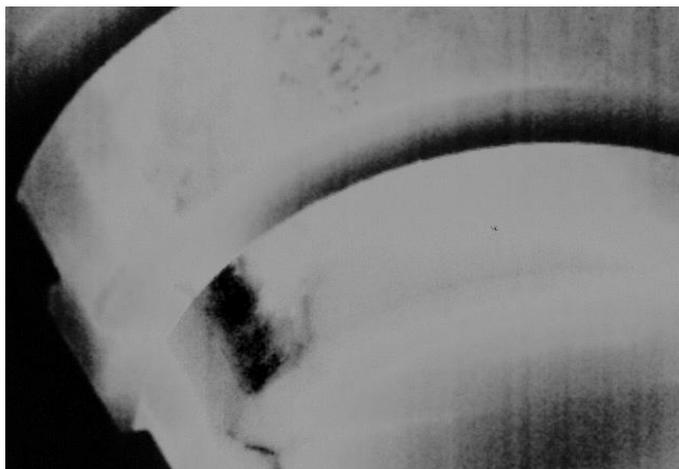


Figura 127.- Imagen Blue (IR).



Figura 128.- Imagen Green (IR).

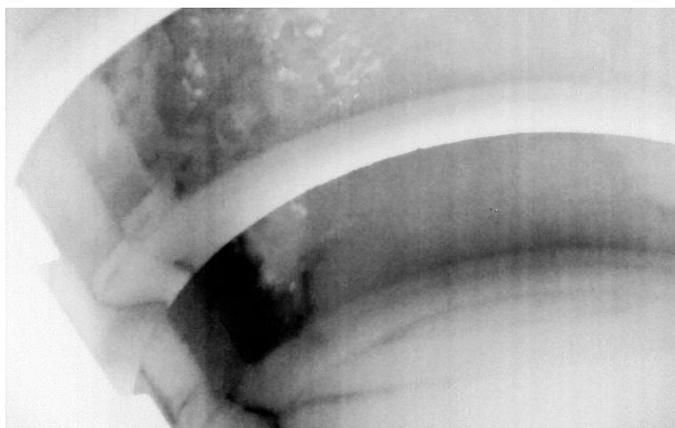


Figura 129.- Imagen Red (IR).

12.2.2.- Segundo paso: umbralización de la imagen.-

El siguiente paso consiste en realizar un umbralizado, esto es, determinar el valor de gris, a partir del cual los puntos serán considerados o no activos. Las pruebas realizadas demostraron que los resultados eran prácticamente idénticos al considerar o no el canal verde (G). Se realizaron pruebas con tres tipos de umbral: adaptativo, Otsu y facultativo

(vía usuario). Esta última solución presentó los resultados más precisos. Veamos estos resultados para los distintos tipos de salida del umbralizado facultativo:

Umbralizado binario puro: los valores por encima del umbral se ponen a gris 255 y el resto a cero. (Figura 130)



Figura 130.- Imagen binaria.

Umbralizado truncado: los valores por debajo del umbral se mantienen y los que están por encima se fijan al valor del umbral. (Figura 131)

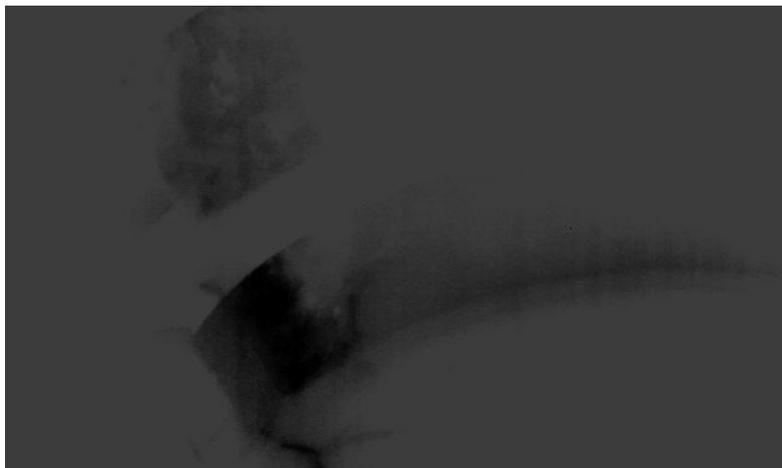


Figura 131.- Imagen truncada.

Umbralizado a cero: los puntos por encima del umbral mantienen su valor y el resto se pone a cero. (Figura 132)

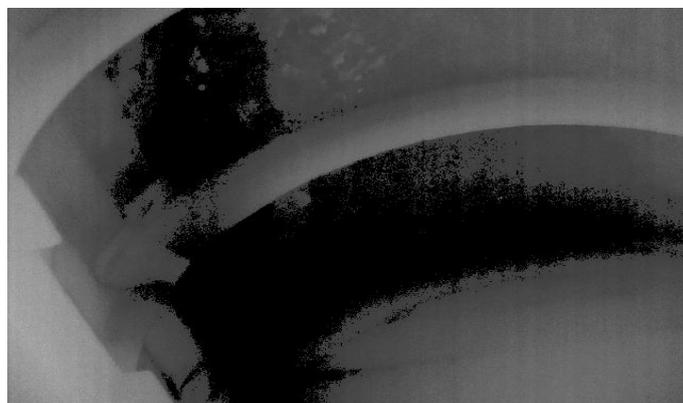


Figura 132.- Imagen con umbral a cero.

Dado que el proceso intenta determinar el área ocupada por los puntos activos, hemos optado por utilizar esta salida para realizar el proceso final de mezcla.

12.2.3.- Tercer paso: mezcla de las imágenes resultantes.-

El último paso del proceso supone mezclar las tres imágenes (merge) teniendo en cuenta un color fijo (verde, debido a su ausencia) para los puntos que no sobrepasan el umbral y que se corresponderán con los puntos activos. (Figura 133)

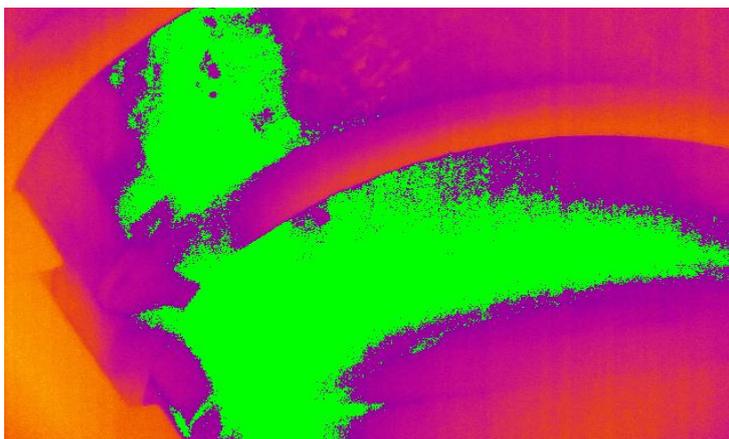


Figura 133.- Imagen procesada. Imagen procesada por división y mezcla de imágenes después del umbral.

Como cálculo final, aparece el número de píxeles activos y el porcentaje de área ocupada por los mismos.

Adicionalmente, el bucle de proceso posibilita al usuario la prueba de distintos umbrales utilizando una barra de desplazamiento en la imagen original, lo que redundará en una mayor versatilidad de la aplicación y permitirá visualizar las isotermas.

12.3.- Visualización de isotermas.-

Desplazando la barra deslizadora (es decir modificando el umbral), somos capaces de visualizar las isotermas, pudiendo detectar las zonas más calientes de la imagen y las más frías.

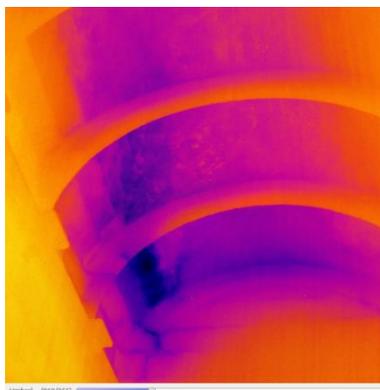


Figura 134.- Imagen original.

Imagen infrarroja con la barra deslizadora.

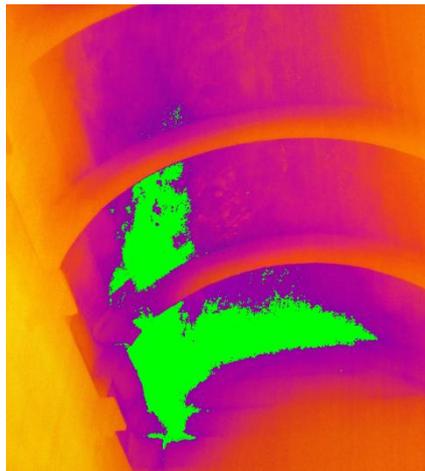


Figura 135.- Imagen umbral 60.

Imagen con umbral 60 (Figura 135), se ha comprobado realizando pruebas que el umbral 60 es una buena medida para detectar una humedad.

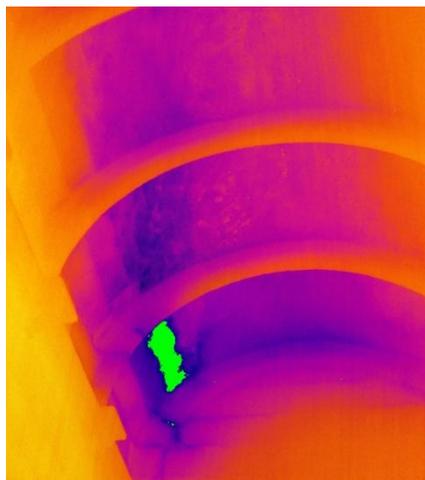


Figura 136.- Isotherma, umbral 15.

Moviendo la barra deslizadora a un umbral menor, se está calculando la isoterma de un área (Figura 137).

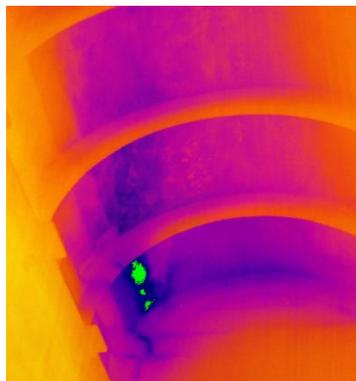


Figura 137.- Isotherma, umbral 5.

Con el umbral casi a 0 se puede detectar la zona más fría de la imagen infrarroja.

12.4.- Pseudocódigo de la aplicación.-

- 1.- Capturar Una imagen IR.
- 2.- Codificada como BGR y realizar las misiones siguientes:
 - A) Pasarla a Gris.
 - B) Crear una ventana con barra de seguimiento (Una barra de Desplazamiento) y asociar la misma a una variable de umbral (nivel).
 - C) Montar un bucle de Proceso con finalización de la Tecla Escape:
 - 1.-Umbralizar la imagen gris umbral con las opciones:
 - A) THRESH_BINARY.
 - B) THRESH_TOZERO.
 - C) THRESH_TRUNC.
 - 2.-Presentar las tres salidas grises.
 - 3.-Descomponer la Imagen original en tres canales.
 - 4.-Mostrar los tres canales en Niveles de gris.
 - 5.-Modificar los tres canales de acuerdo con el umbral.
 - 6.-Mezclar los tres canales en una imagen coloreada.
 - 7.-Mostar el resultado en una nueva ventana.
 - D) Salir y presentar resultados de nº de píxeles activos y porcentaje de área ocupada por los mismos.

13.- Estudio geométrico.-

13.1.- Introducción.-

El estudio geométrico de la Catedral se realiza desde el punto de vista de las desviaciones verticales y de las deformaciones de las bóvedas a partir de las ortoimágenes obtenidas con la técnica del láser escáner.

Las desviaciones verticales se calculan tomando la sección del centro la bóveda y se mide la distancia entre la parte superior e inferior de los muros (Figura 138). La diferencia de ambas distancias cuantifica la falta de verticalidad.

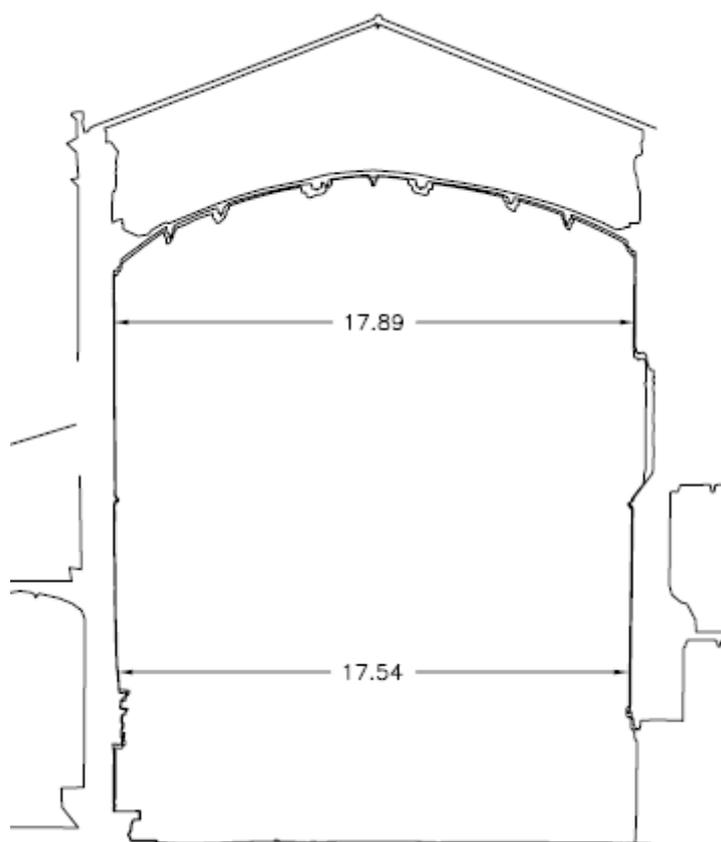


Figura 138.- Ejemplo del cálculo de las desviaciones verticales.

Las deformaciones de las bóvedas se han calculado considerando dos modos de diseño de bóvedas rebajadas que coexistieron de manera simultánea a principios del siglo XVI (Huerta, 2004).

El primer método está basado en proporciones matemáticas que relaciona las luces de los vanos con fracciones del tipo $1/3$, $1/6$, $1/9$... Se relacionan las luces de las bóvedas, con la división de sus diámetros en segmentos de manera proporcional. Si se observa la figura 139, el diámetro de la bóveda es de 17.89 y la luz del vano mide 3.021. La relación entre el vano y el diámetro es de $1/5.92$, de lo que se deduce que la relación teórica de la construcción fue de $1/6$. Aplicando esta relación el vano teórico debería

medir 2.98. Trazando sobre el perfil de la bóveda el vano teórico se determina una variación con la bóveda real de 4.1 cm.

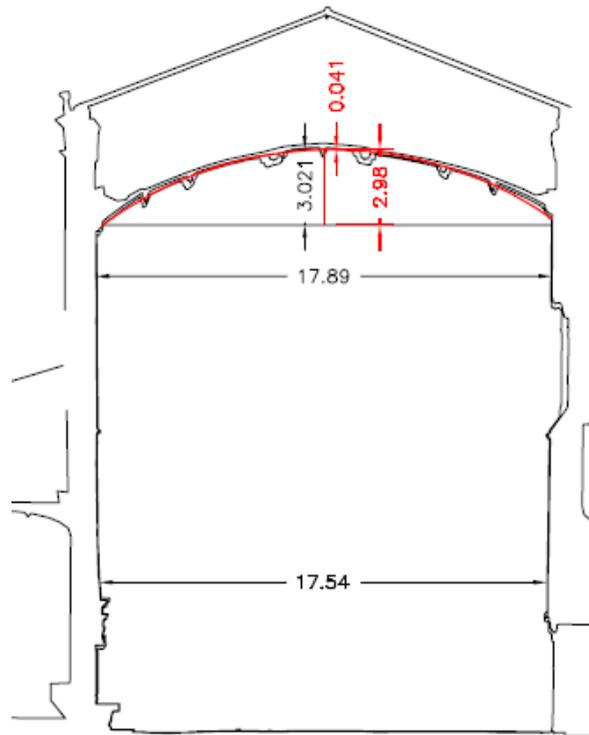


Figura 139.- Método basado en la relación entre las luces y el diámetro.

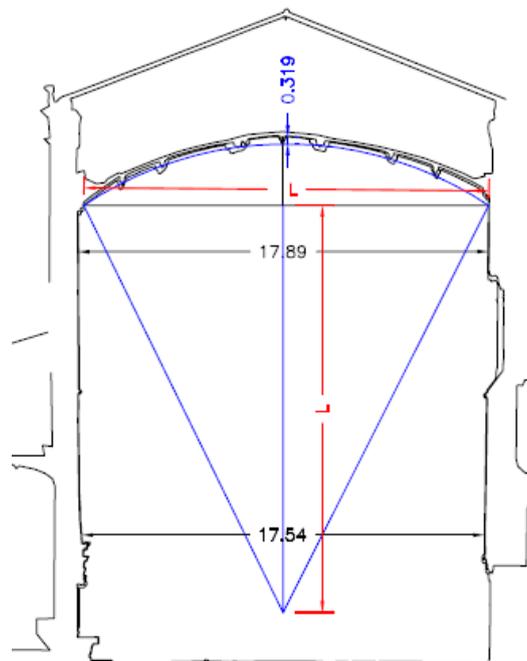


Figura 140.- Método relación bóvedas-triángulo isósceles.

Método basado en la relación entre la curvatura de las bóvedas y el vértice de un triángulo isósceles.-

El segundo método responde a la utilización de la trigonometría como herramienta para relacionar los centros de curvatura de las bóvedas con el vértice de un triángulo

isósceles (Figura 140). Para ello se proyecta el diámetro, convirtiéndose en el vértice de un triángulo isósceles. Se traza una circunferencia con un diámetro equivalente a un lado mayor del triángulo. Y finalmente, se compara el trazado teórico de la bóveda con el real, que en este caso presenta un diferencia de 31.9 cm.

Además de este estudio geométrico de la Catedral, las ortoimágenes también han servido para proyectar los planos en planta y alzado, realizados por la Oficina de Arquitectura del arquitecto D. Francisco Jurado Jiménez. Todo este trabajo será utilizado por otras disciplinas y será válido para el diagnóstico de las diversas patologías que afectan a la estructura de la Catedral.

A continuación, se presentan los planos de las plantas y los alzados longitudinales y la ortoimagen de la que parten.

Los planos transversales van a servir para comparar la falta de verticalidad de los muros con el estudio realizado directamente de la ortoimagen.

13.2.- Plantas.-

Sobre este alzado se presenta la situación de las diferentes secciones de planta que se han realizado para obtener la ortoimagen y posteriormente los planos.

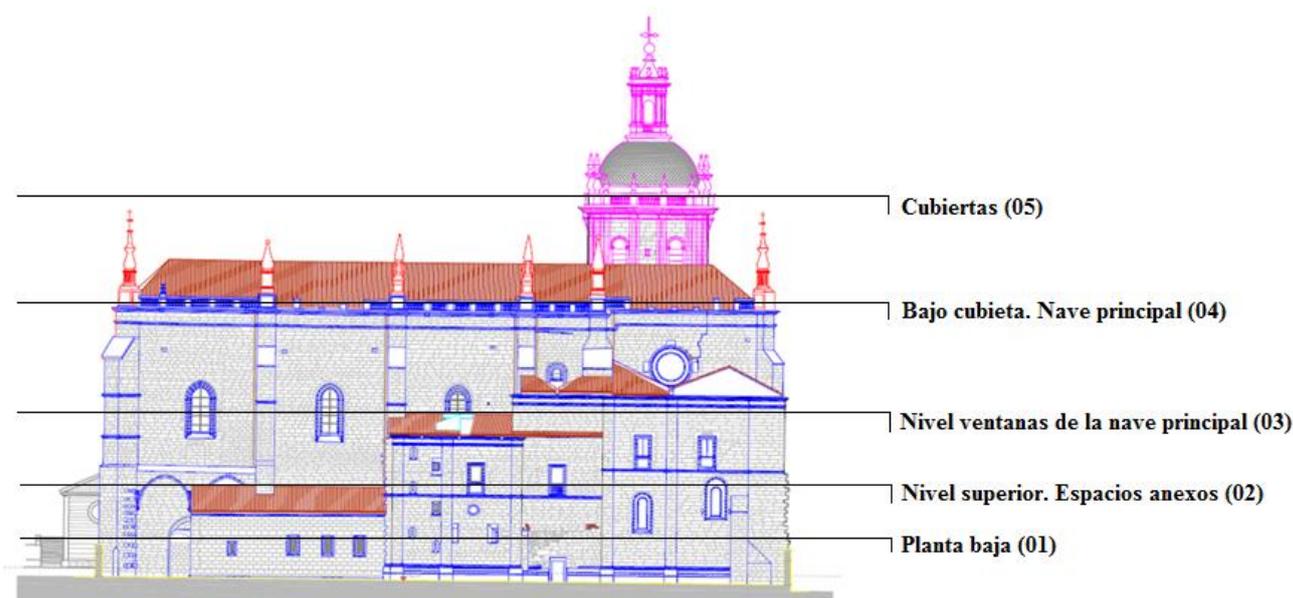


Figura 141.- Situación de los cortes de las plantas.

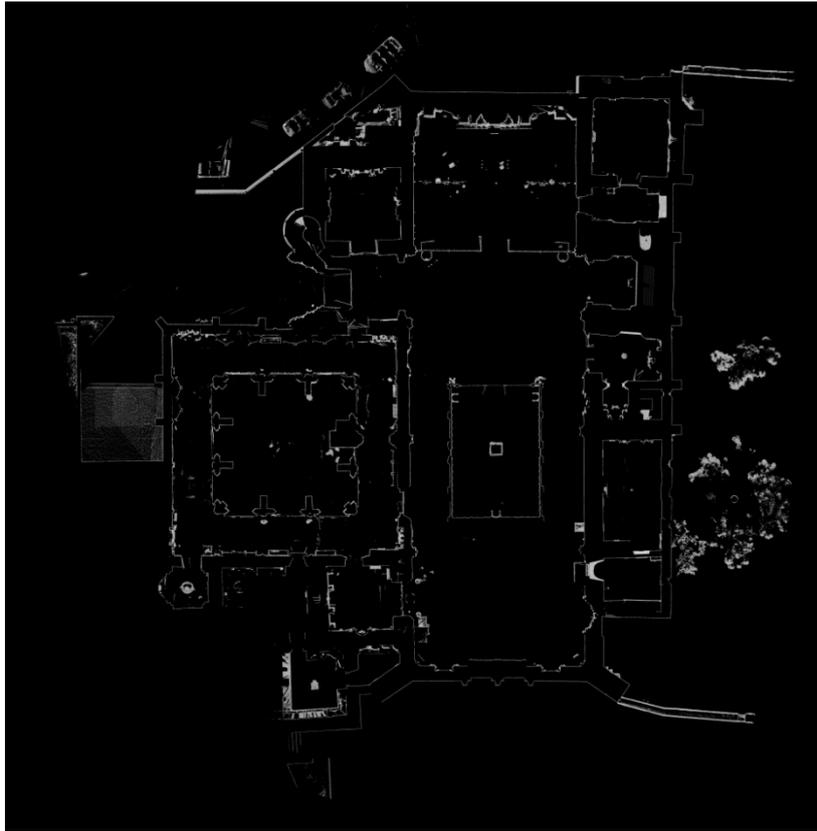


Figura 142.- Ortoimagen de la planta baja (01).

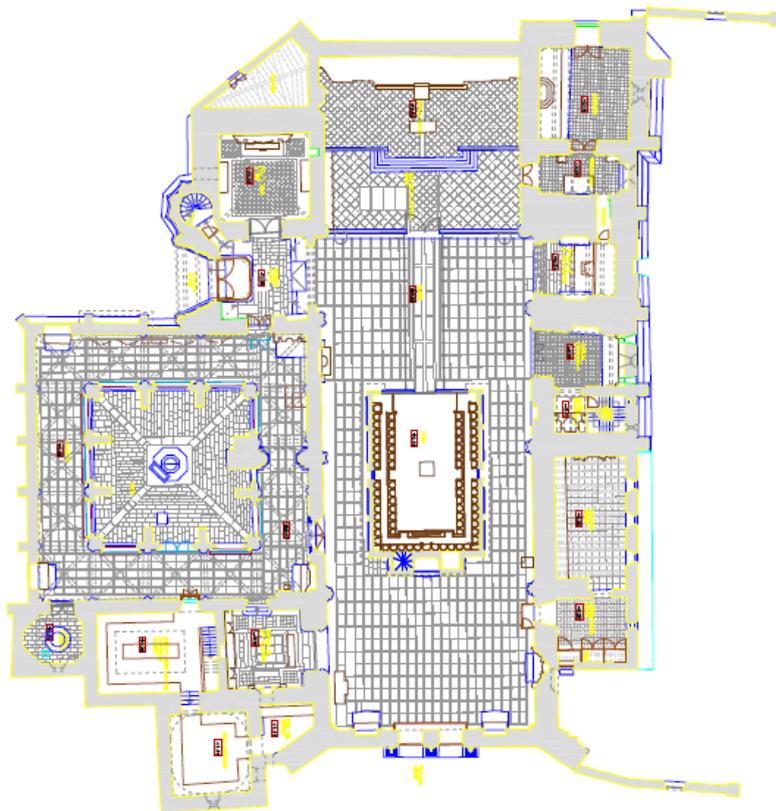


Figura 143.- Planta baja (01).

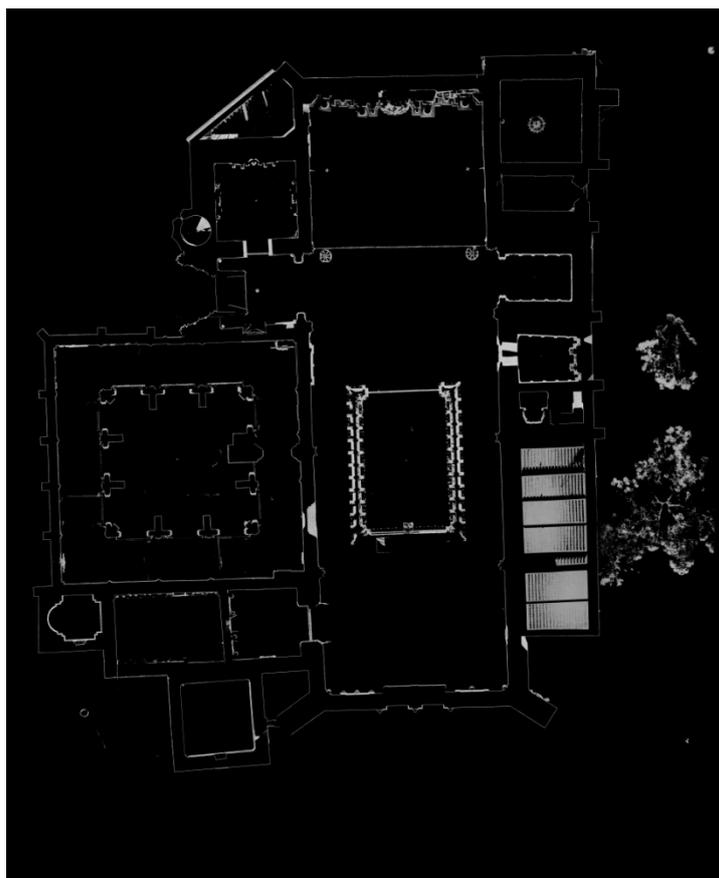


Figura 144.- Ortoimagen del nivel superior. Espacios anexos (02).

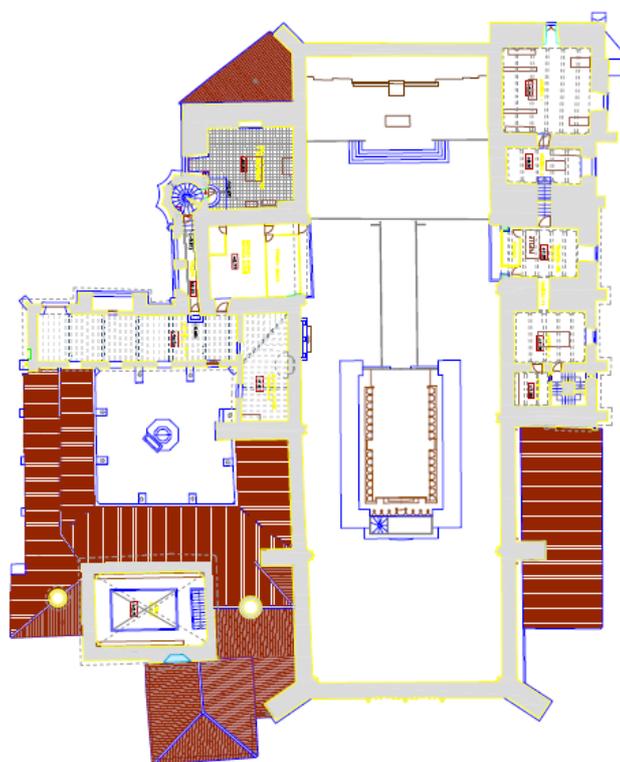


Figura 145.- Nivel superior. Espacios anexos (02).

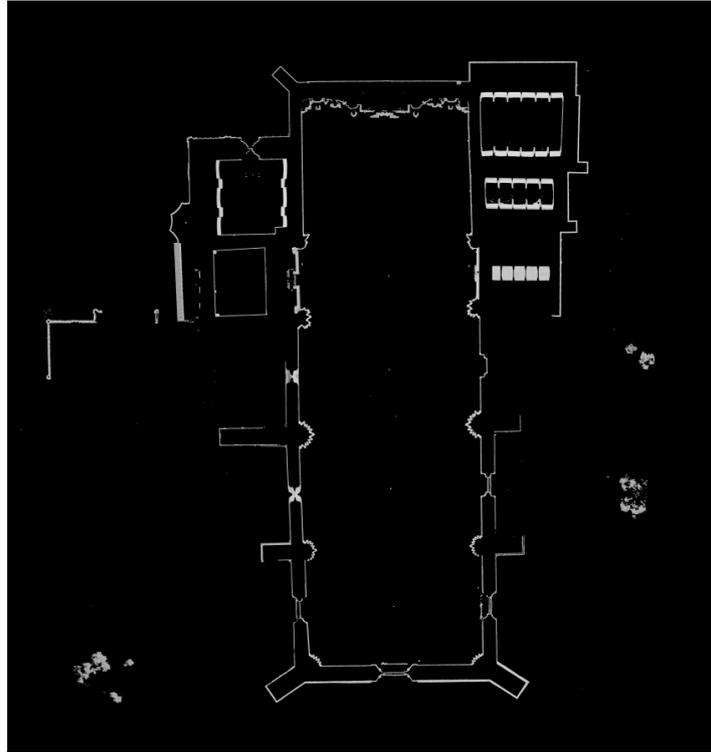


Figura 146.- Ortoimagen del nivel ventanas de la nave principal (03).

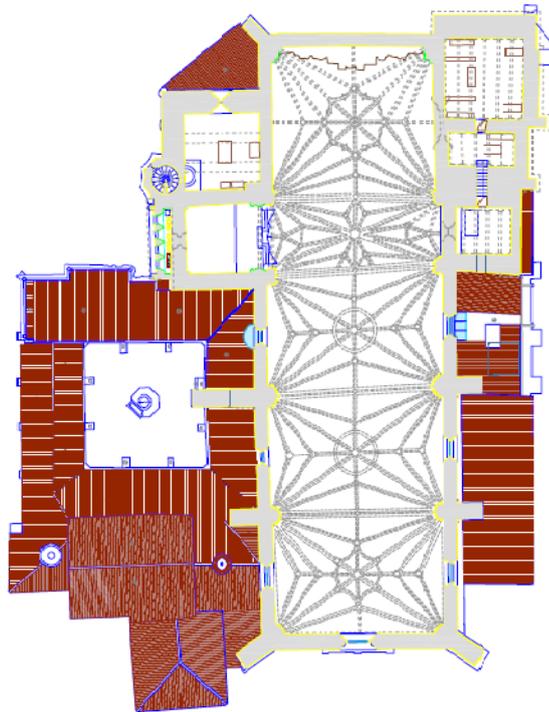


Figura 147.- Nivel ventanas de la nave principal (03).

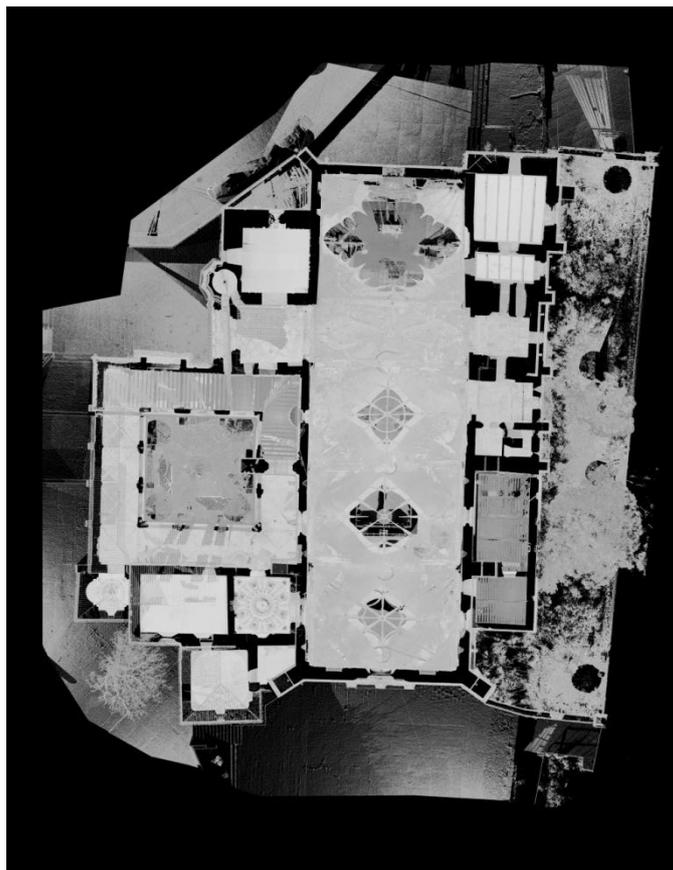


Figura 148.- Ortoimagen del bajo de la cubierta. Nave principal (04).

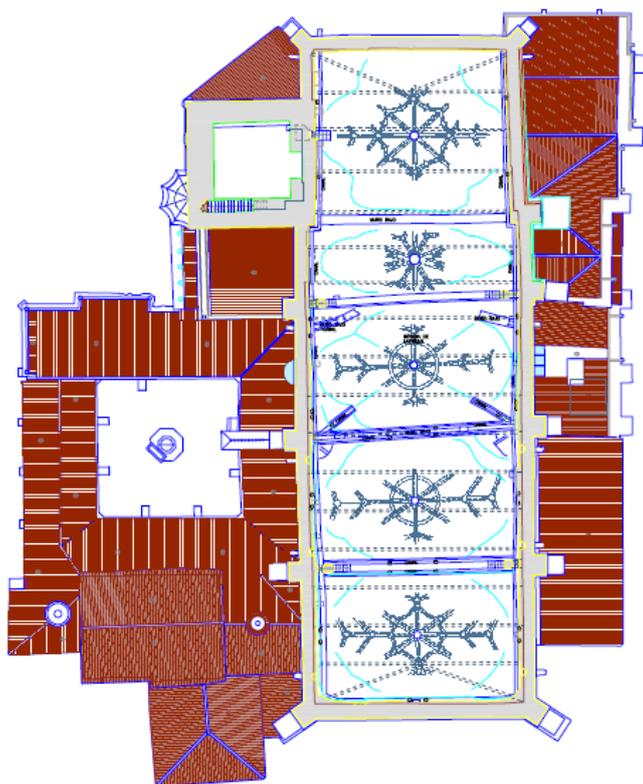


Figura 149.- Bajo cubierta. Nave principal (04).

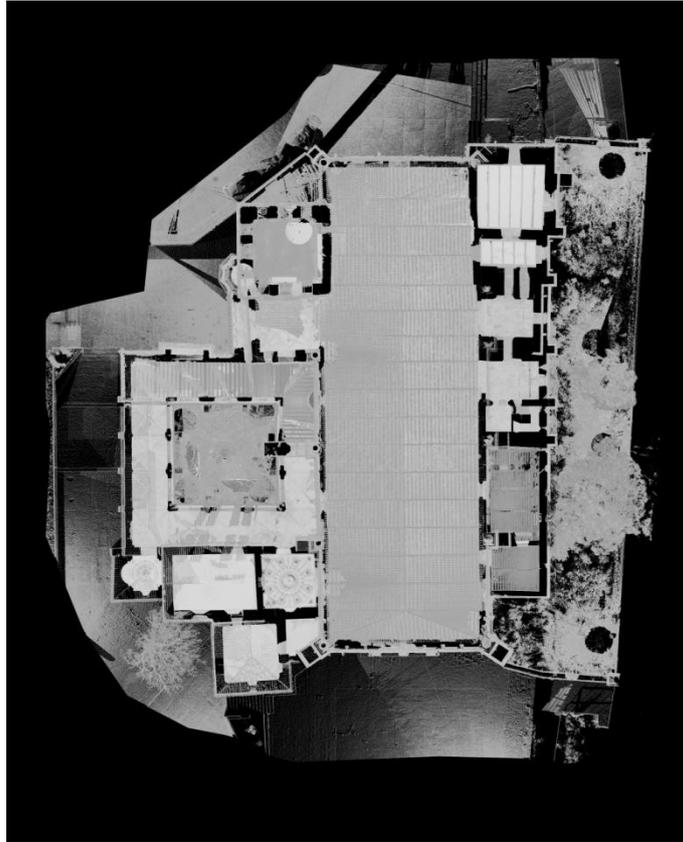


Figura 150.- Ortoimagen de las cubiertas (05).

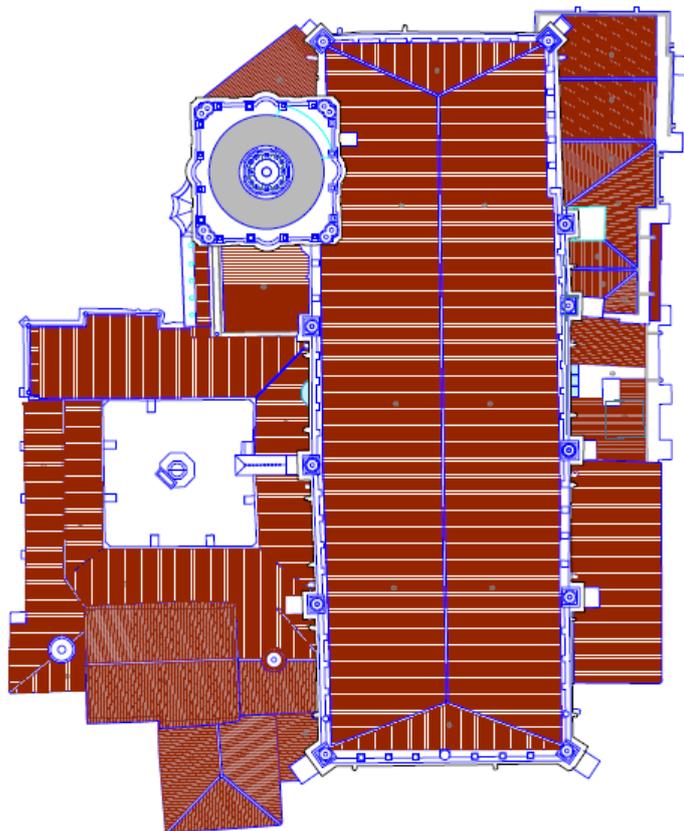


Figura 151.- Cubiertas (05).

13.3. Secciones longitudinales.-

Las secciones longitudinales no se han utilizado para las desviaciones verticales ya que éstas solamente se han podido cuantificar de forma fiable en las secciones transversales.

A continuación se muestran la ortoimagen y el plano en alzado. Se incorpora un pequeño croquis que sitúa la sección en el conjunto de la Catedral y con dos pequeñas flechas se indica la vista.

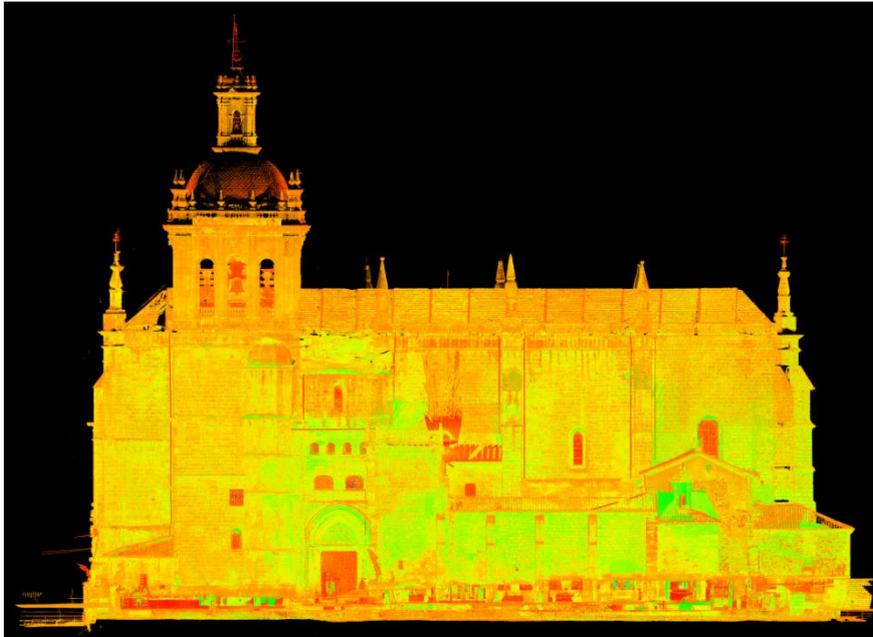


Figura 152.- Ortoimagen de la sección norte.

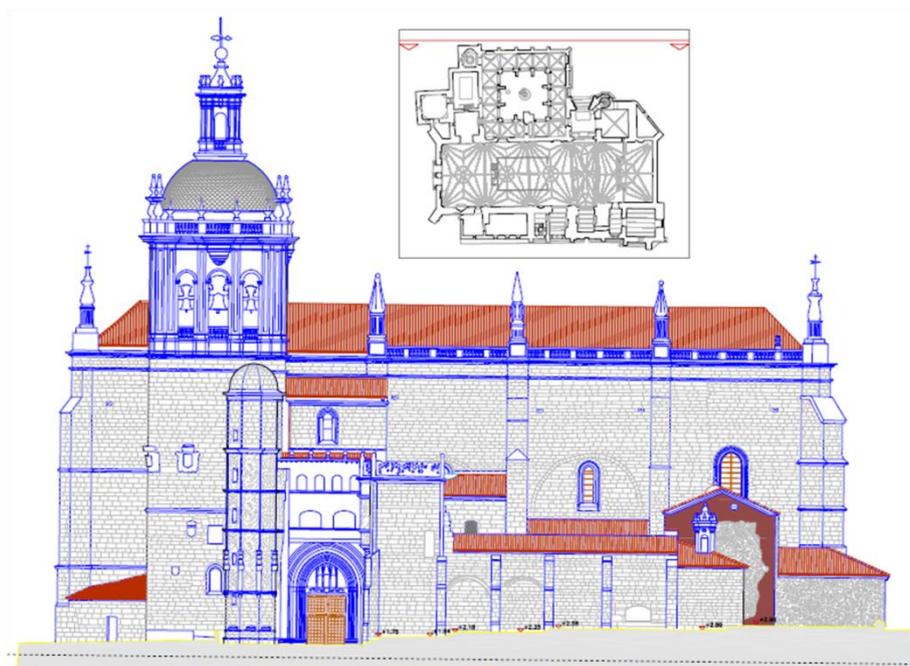


Figura 153.- Sección norte.



Figura 154.- Ortoimagen de la sección SL5.

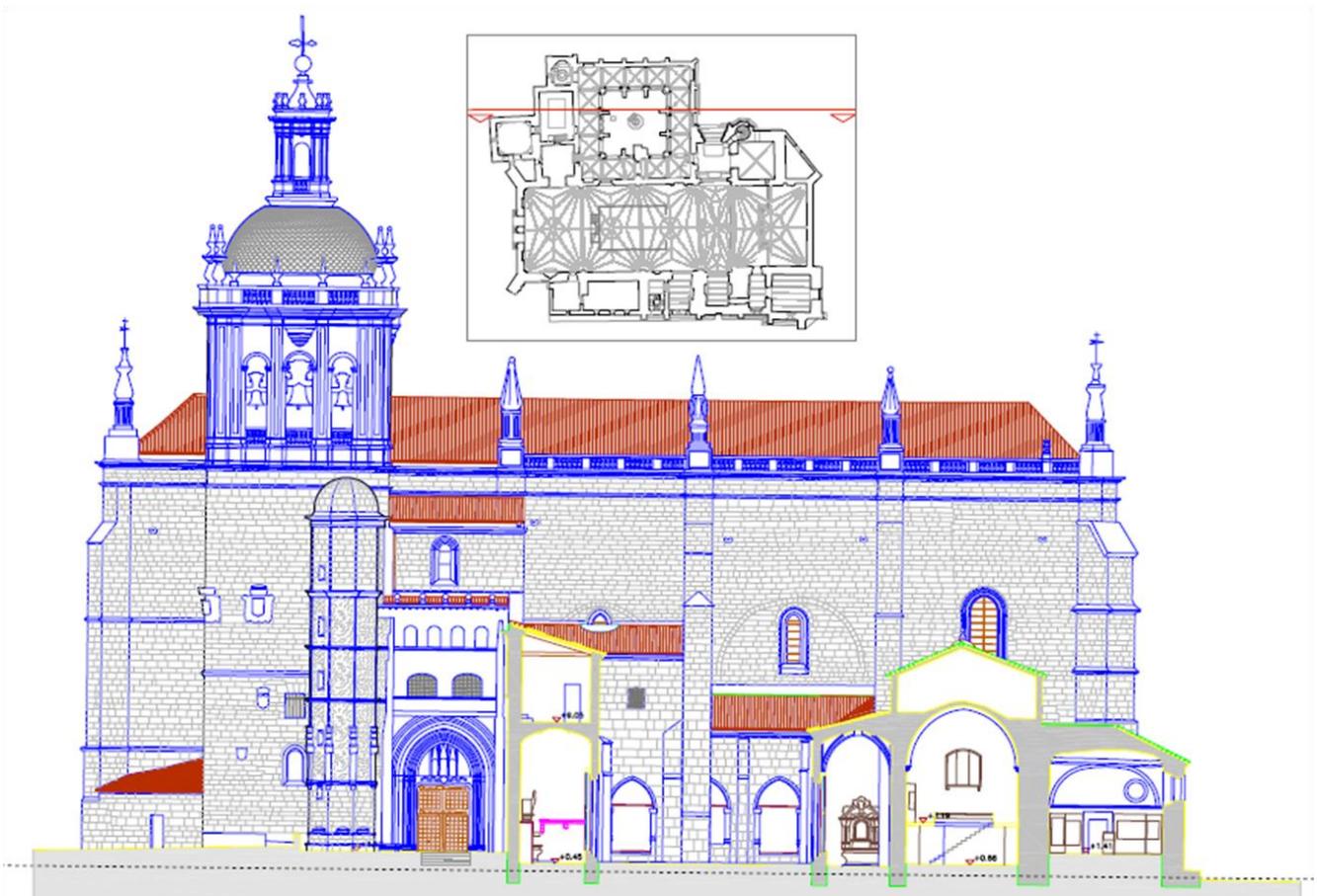


Figura 155.- Sección SL5.



Figura 156.- Ortoimagen de la sección SL6.

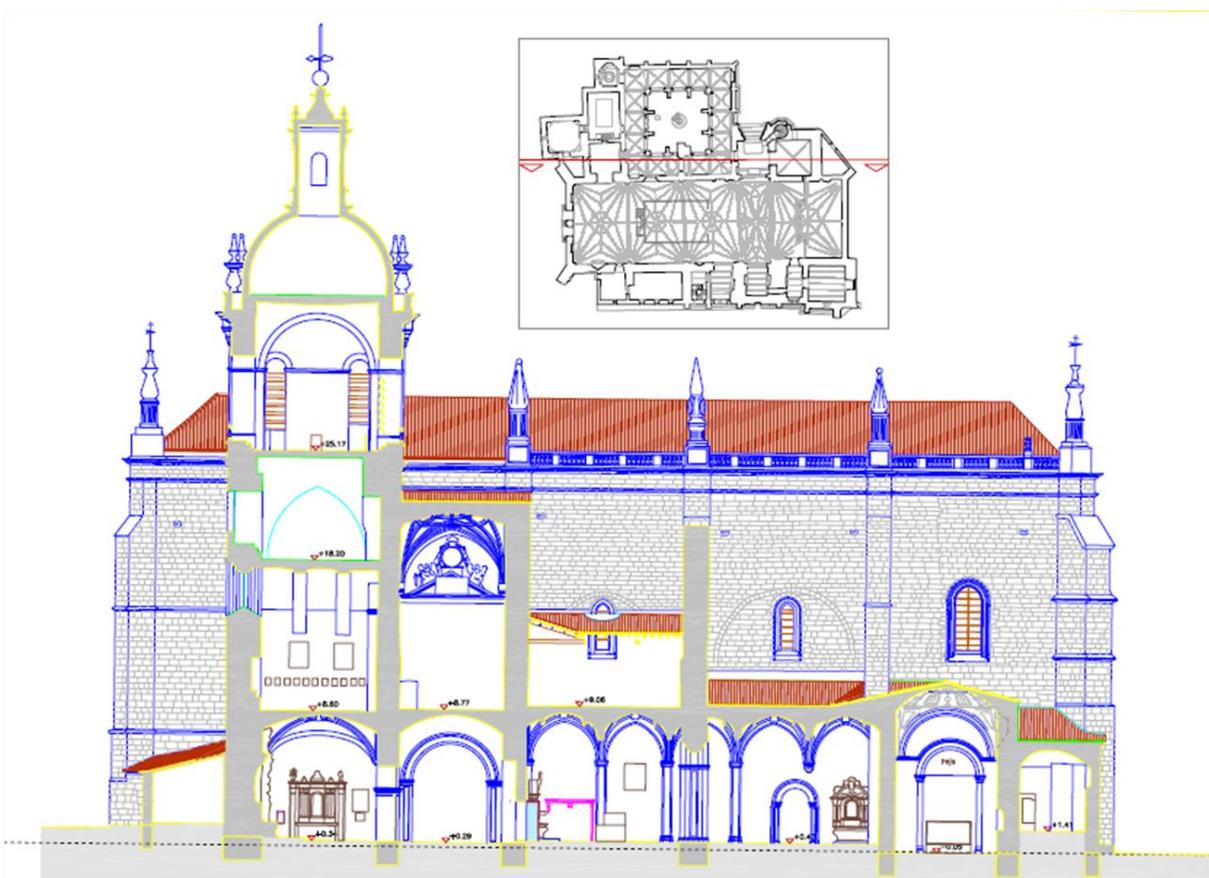


Figura 157.- Sección SL6.

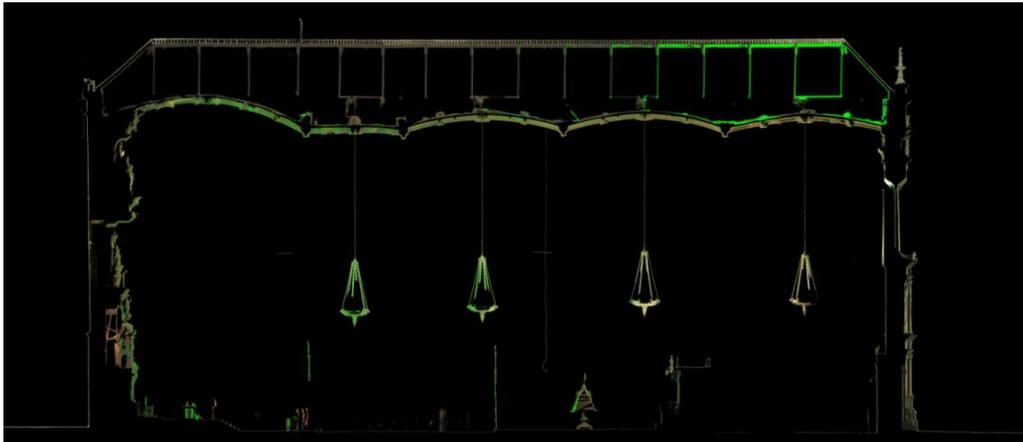


Figura 158.- Ortoimagen de la sección SL2.

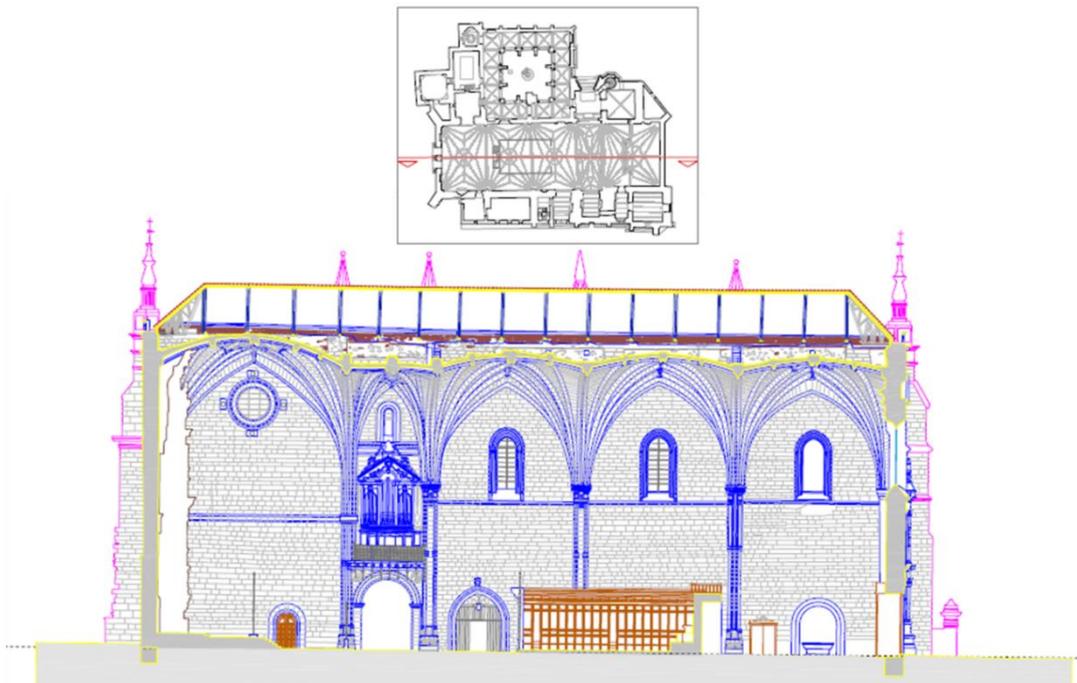


Figura 159.- Sección SL2.



Figura 160.- Ortoimagen de la sección SL3.

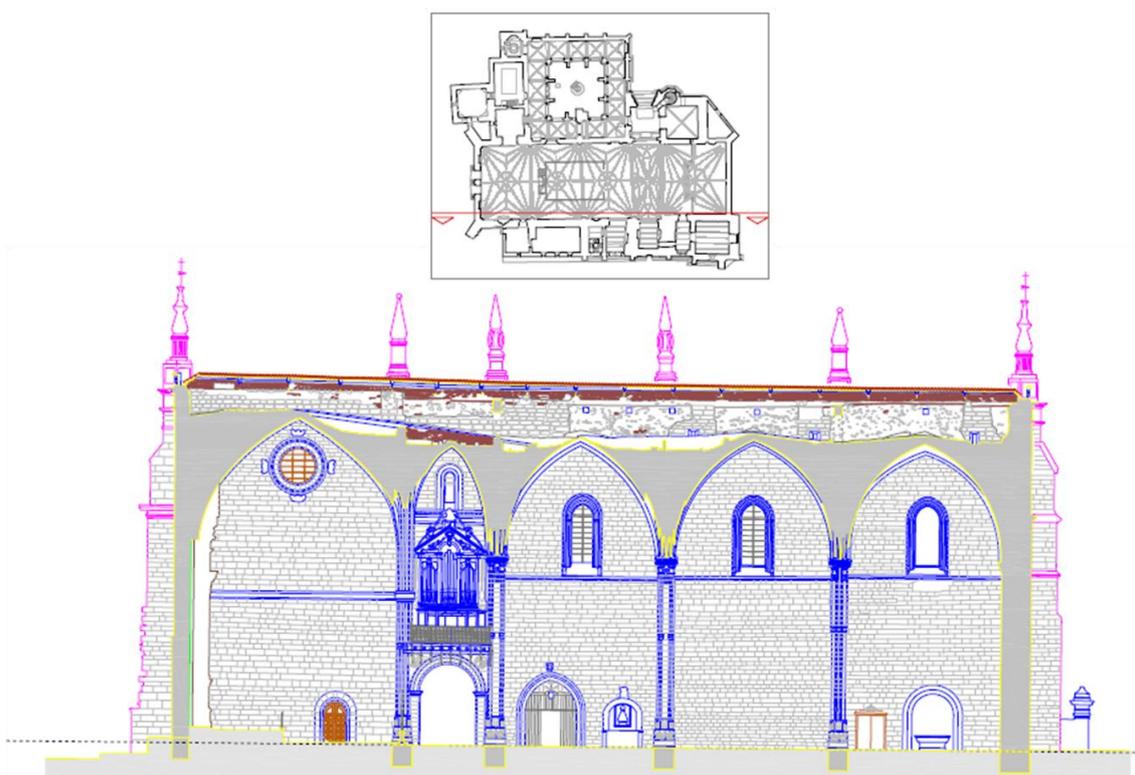


Figura 161.- Sección SL3.

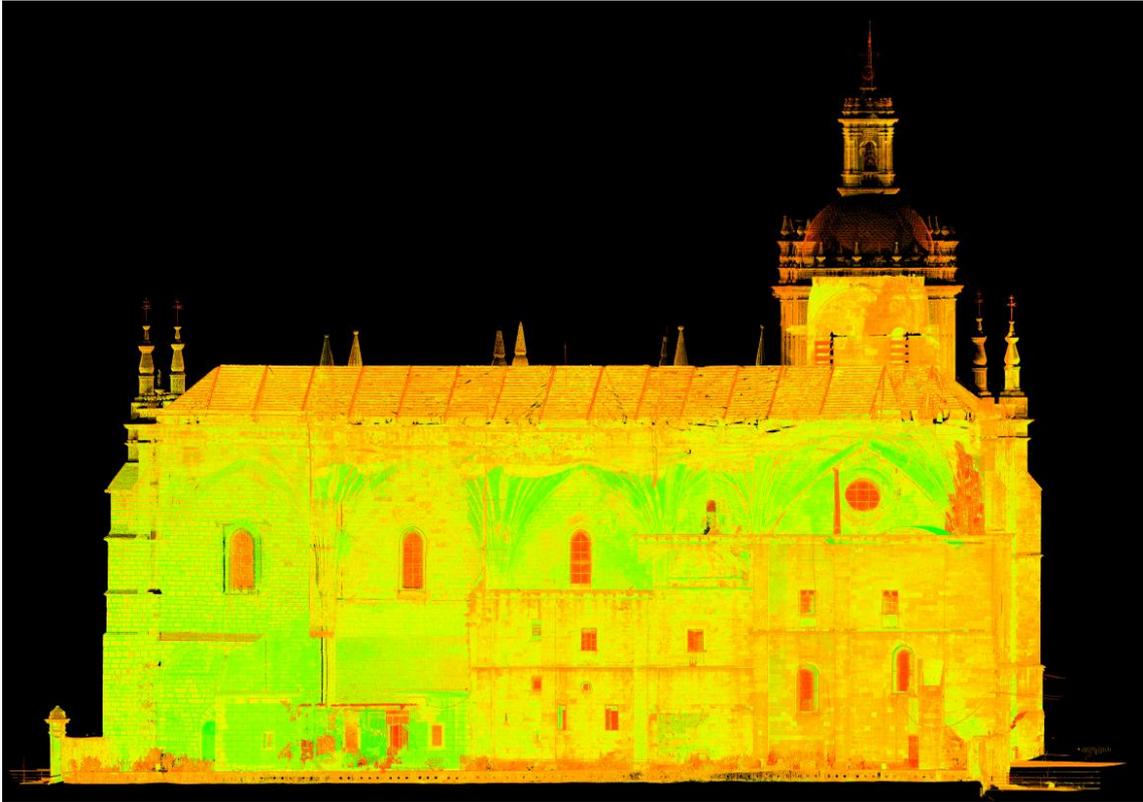


Figura 162.- Ortoimagen de la sección sur.

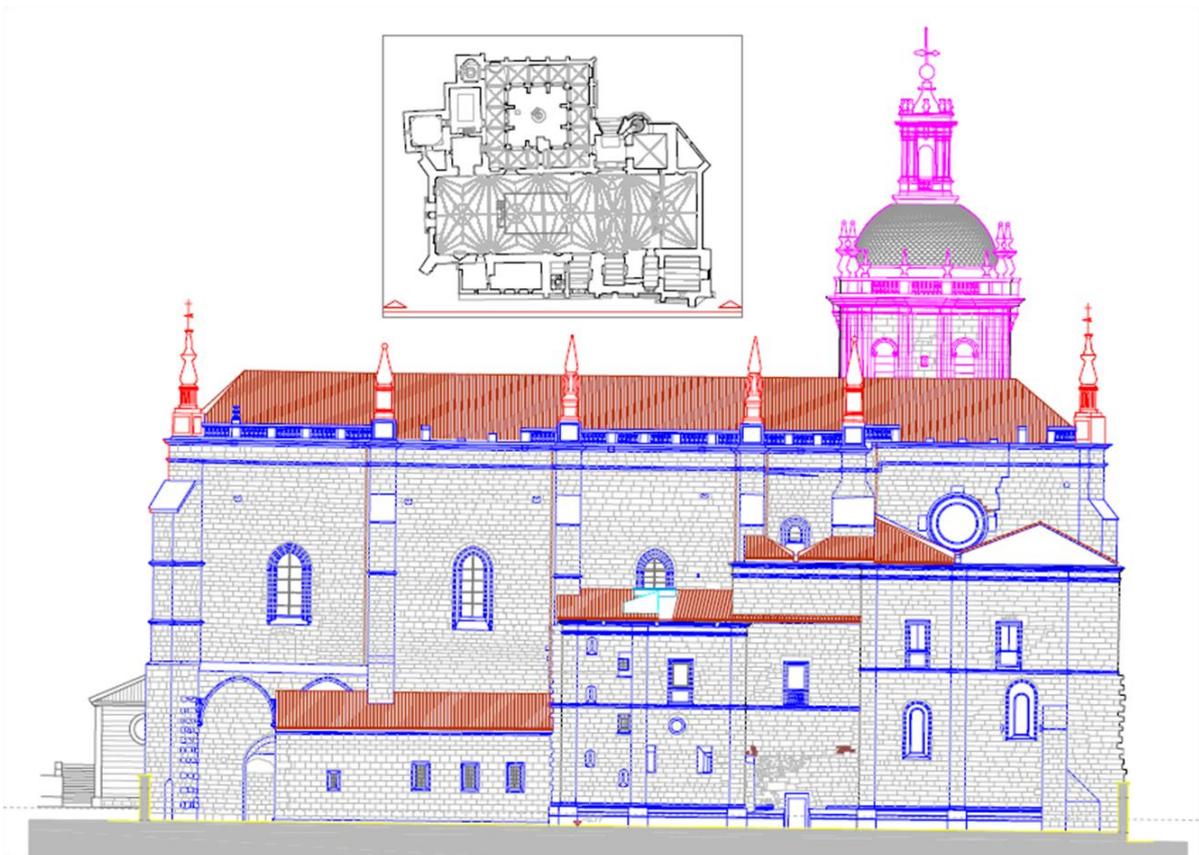


Figura 163.- Sección sur.

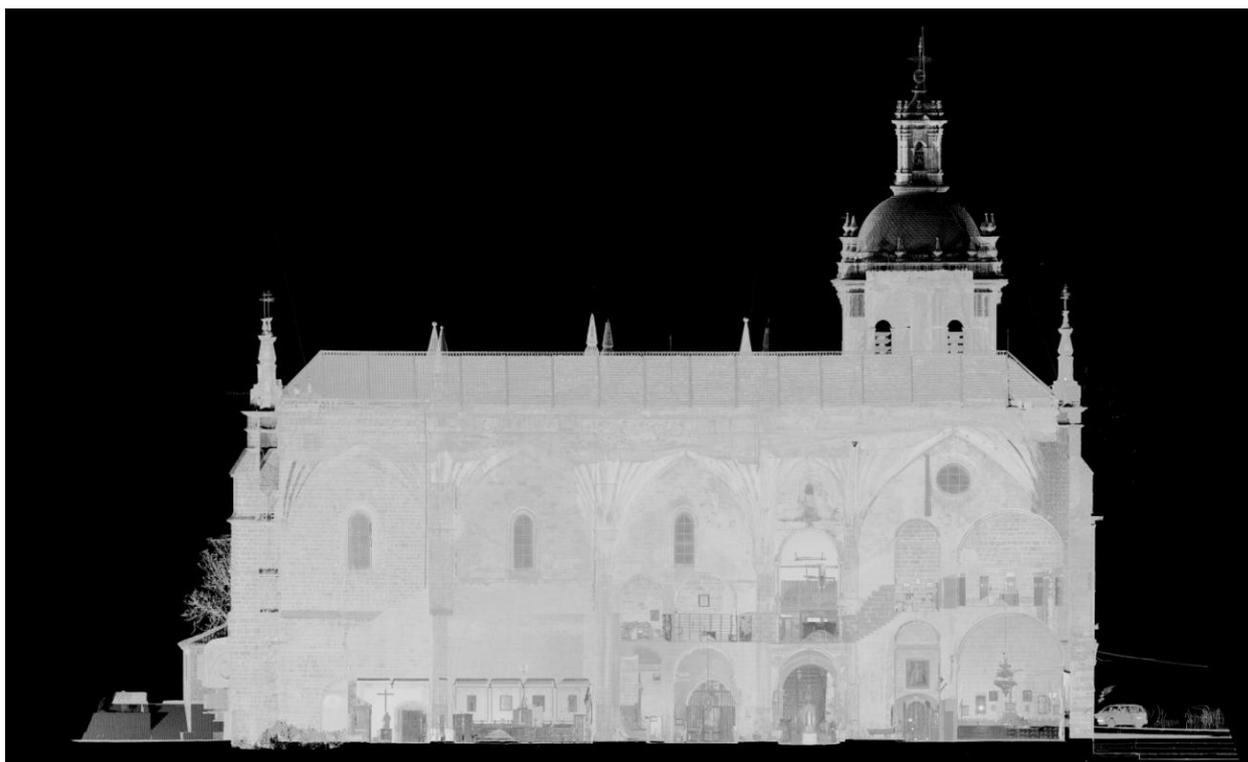


Figura 164.- Ortoimagen de la sección SL4.

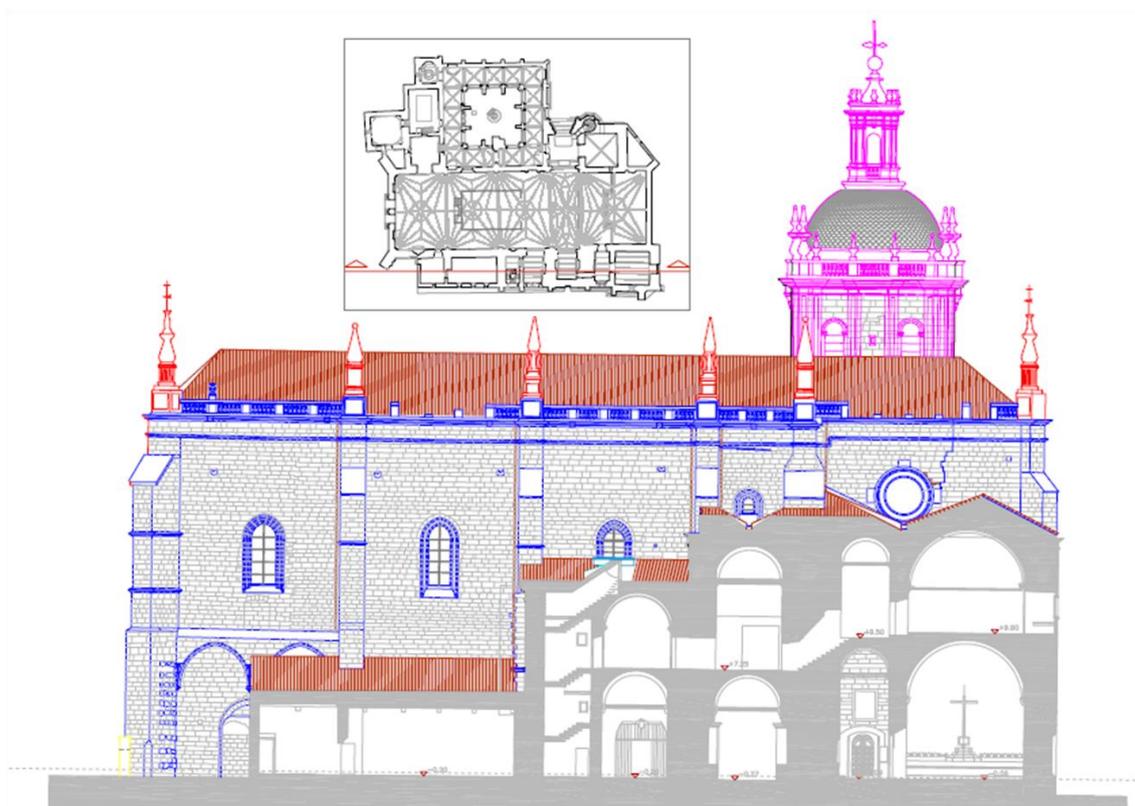


Figura 165.- Sección SL4.

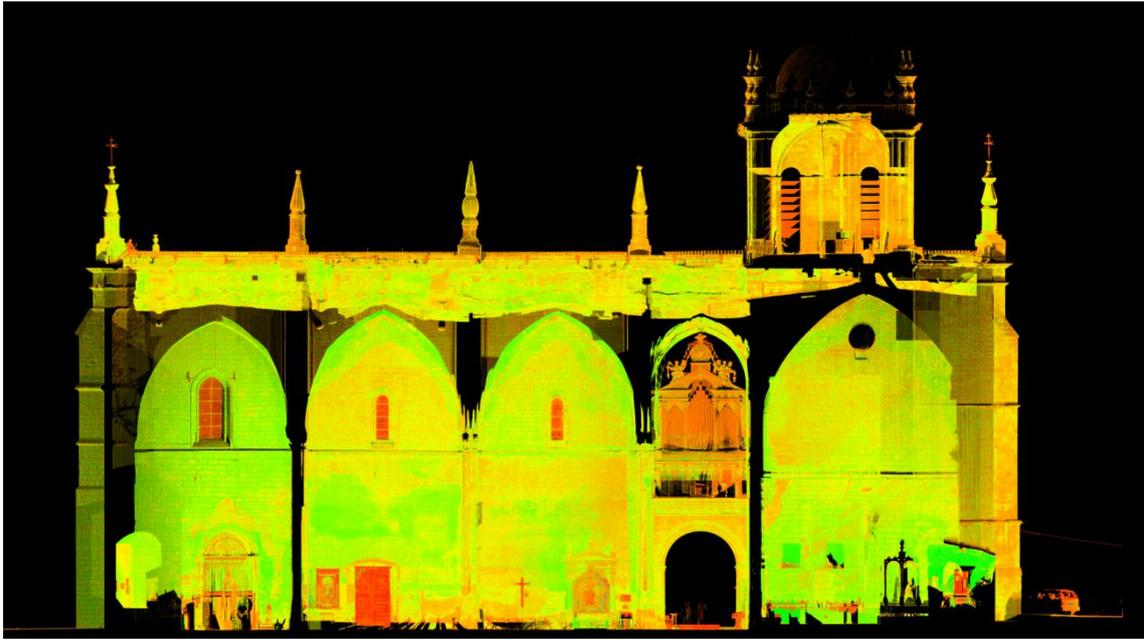


Figura 166.- Ortoimagen de la sección SL1.

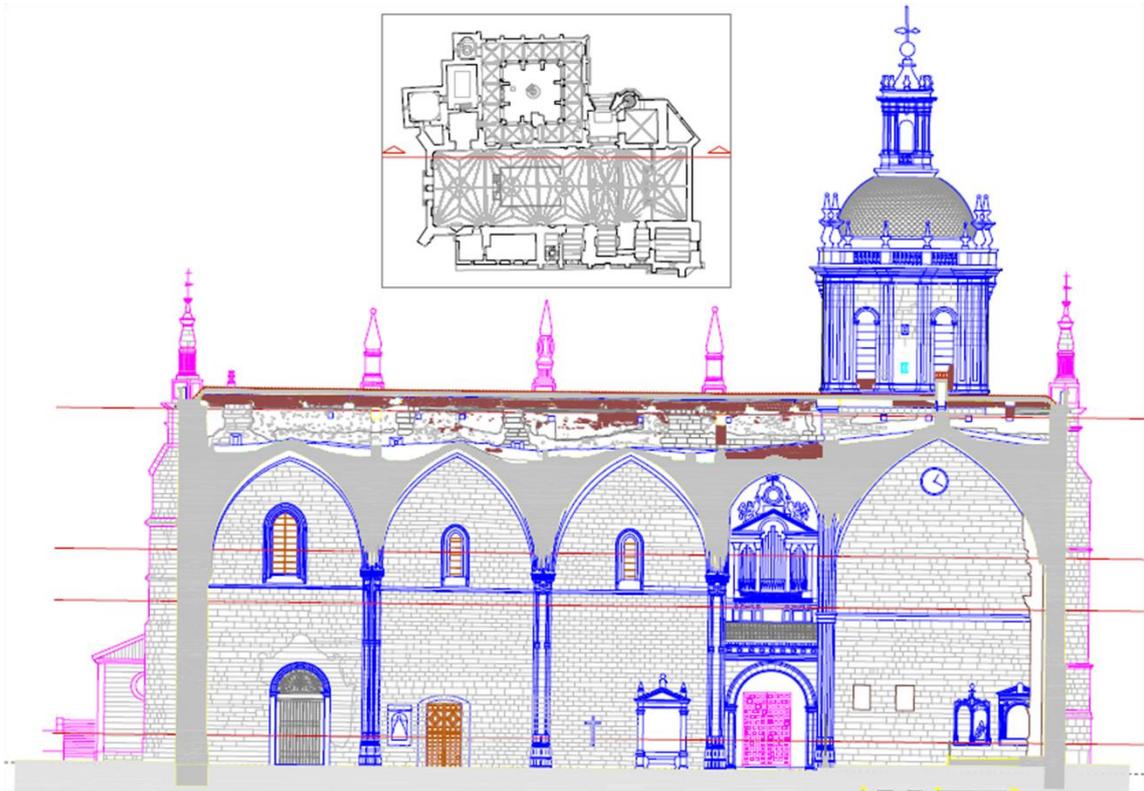


Figura 167.- Sección SL1.

13.4.- Secciones transversales.-

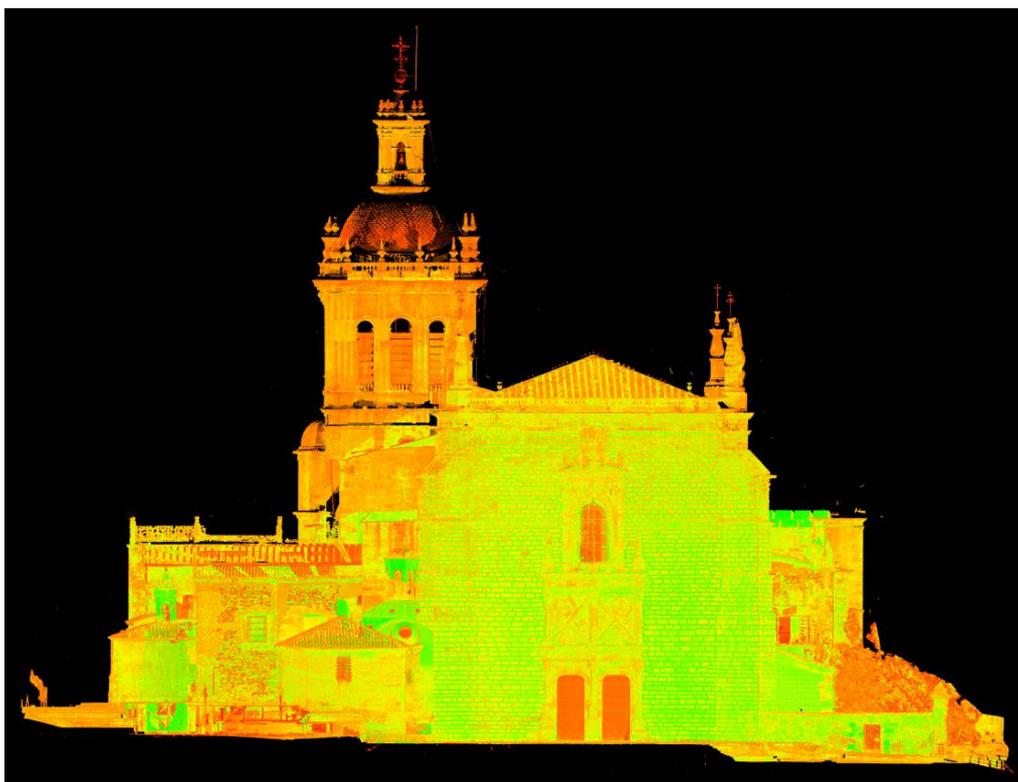


Figura 168.- Ortoimagen de la sección oeste.

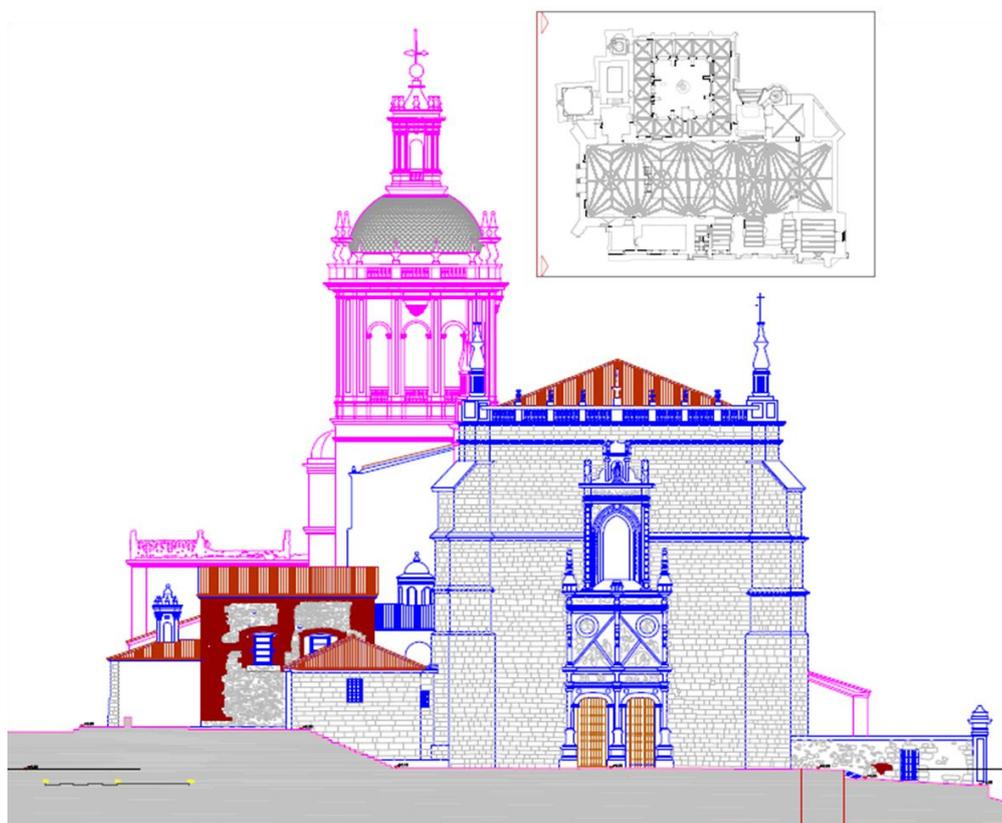


Figura 169.- Sección oeste.



Figura 170.- Ortoimagen sección oeste ST1.

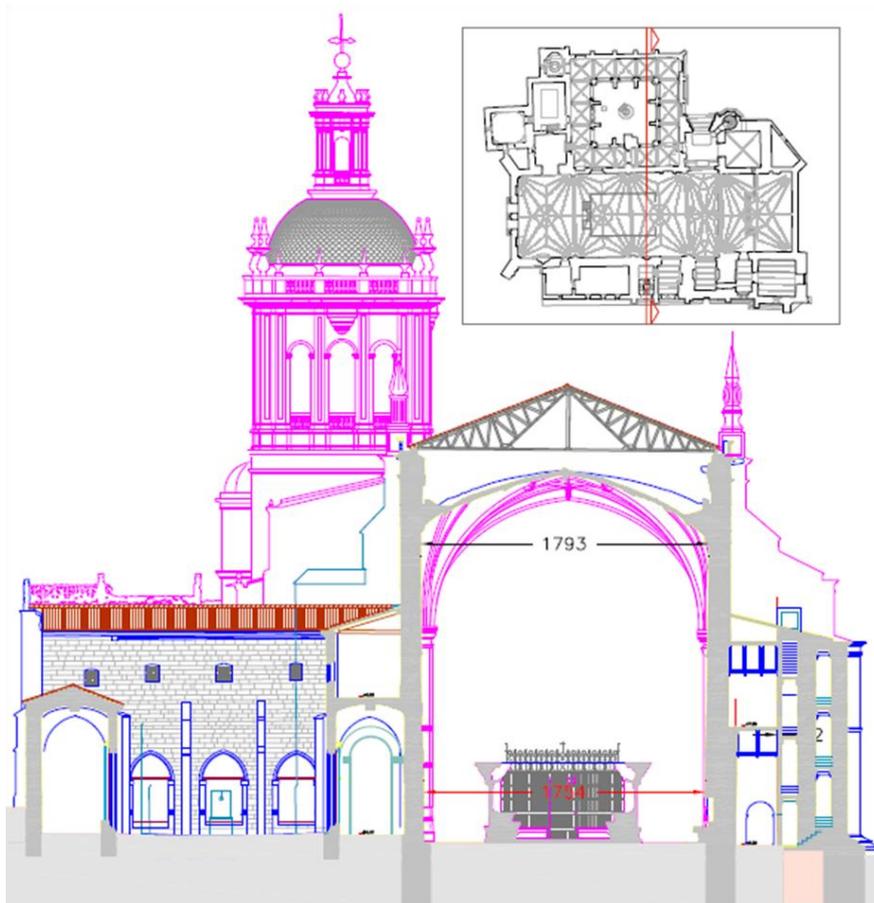


Figura 171.- Sección oeste ST1.

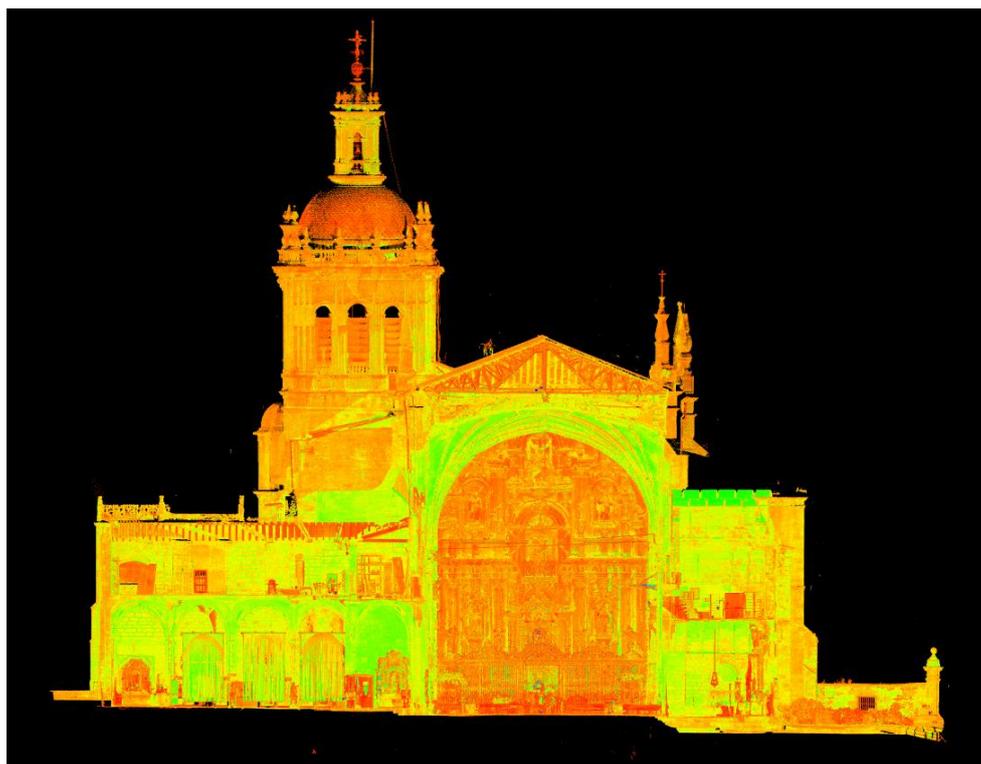


Figura 172.- Ortoimagen sección oeste ST2.

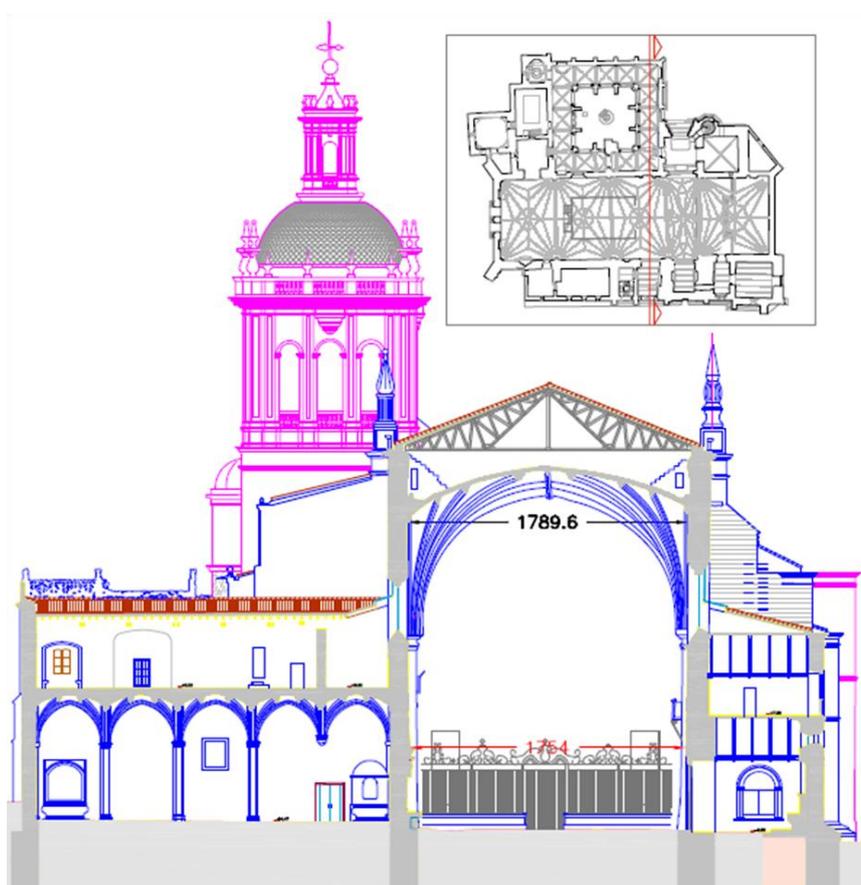


Figura 173.- Sección oeste ST2.

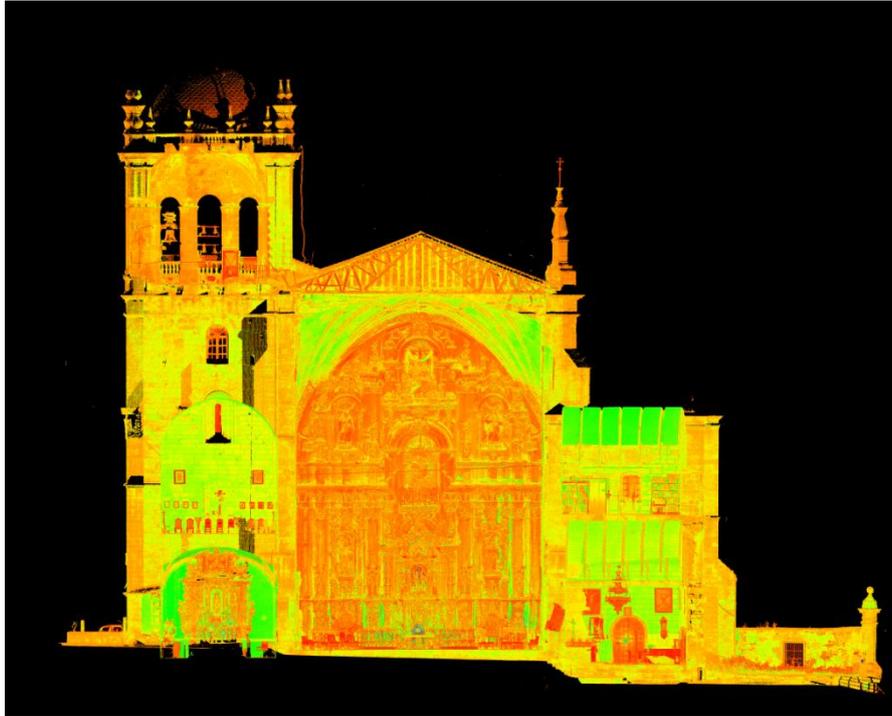


Figura 174.- Ortoimagen sección oeste ST3.

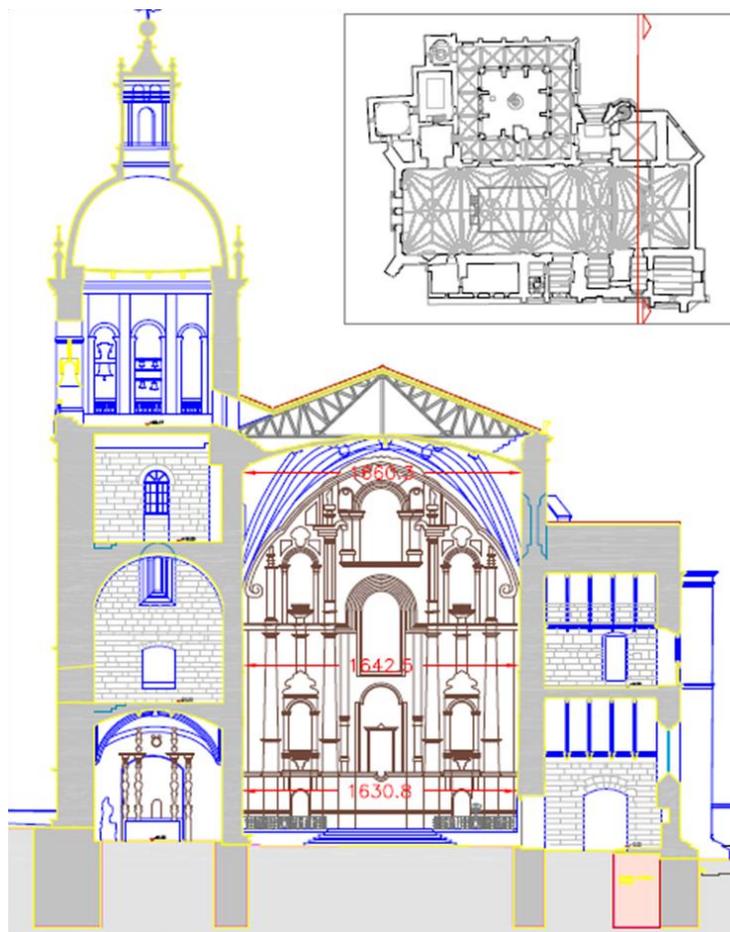


Figura 175.- Sección oeste ST3.

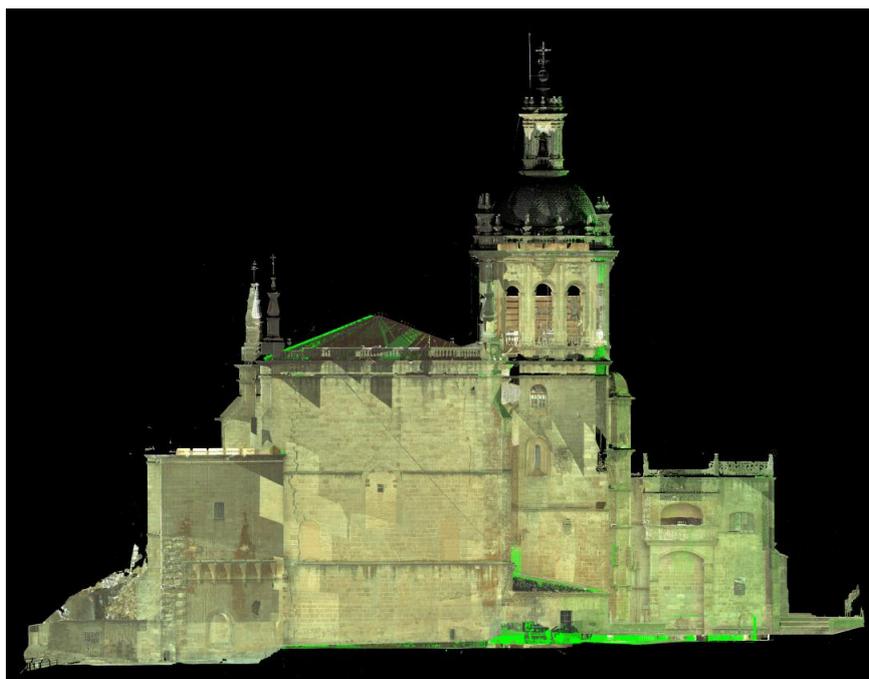


Figura 176.- Ortoimagen sección este.

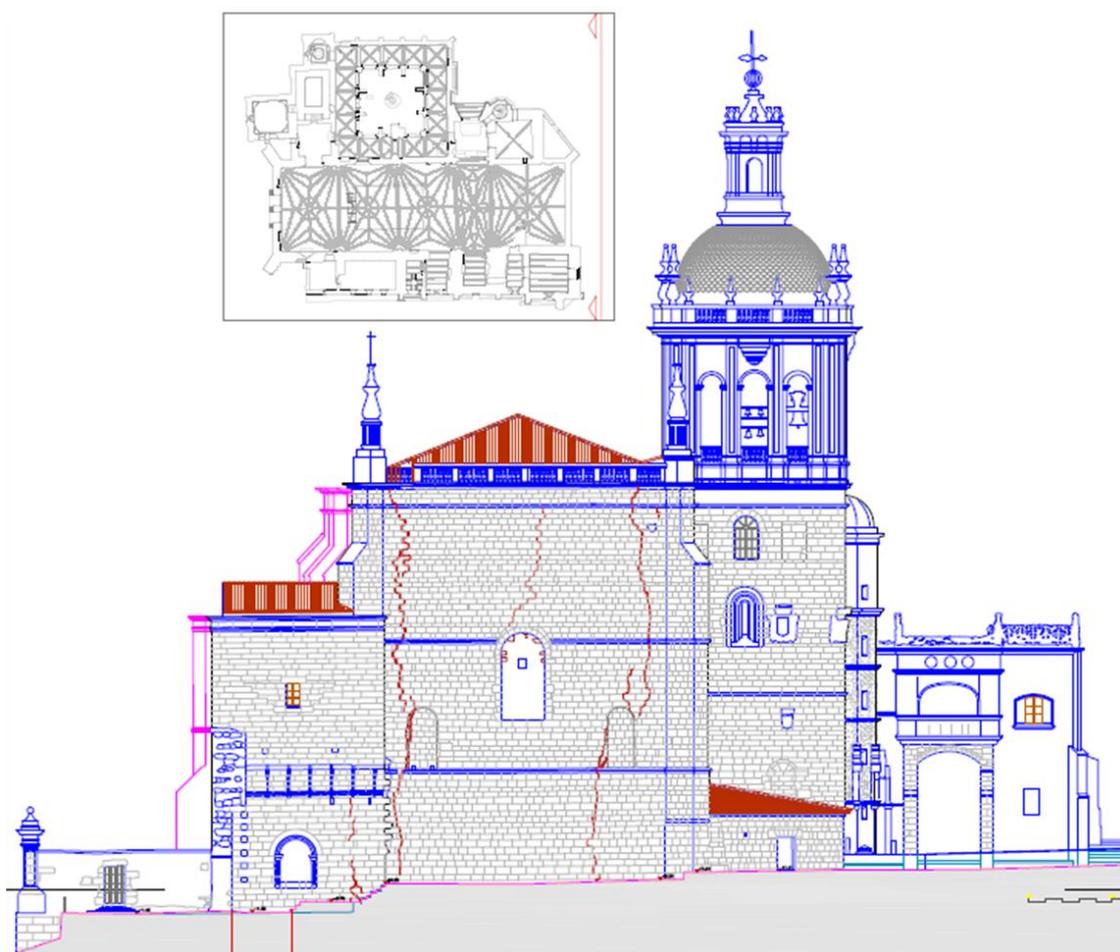


Figura 177.- Sección este.



Figura 178.- Ortoimagen sección este ST1.

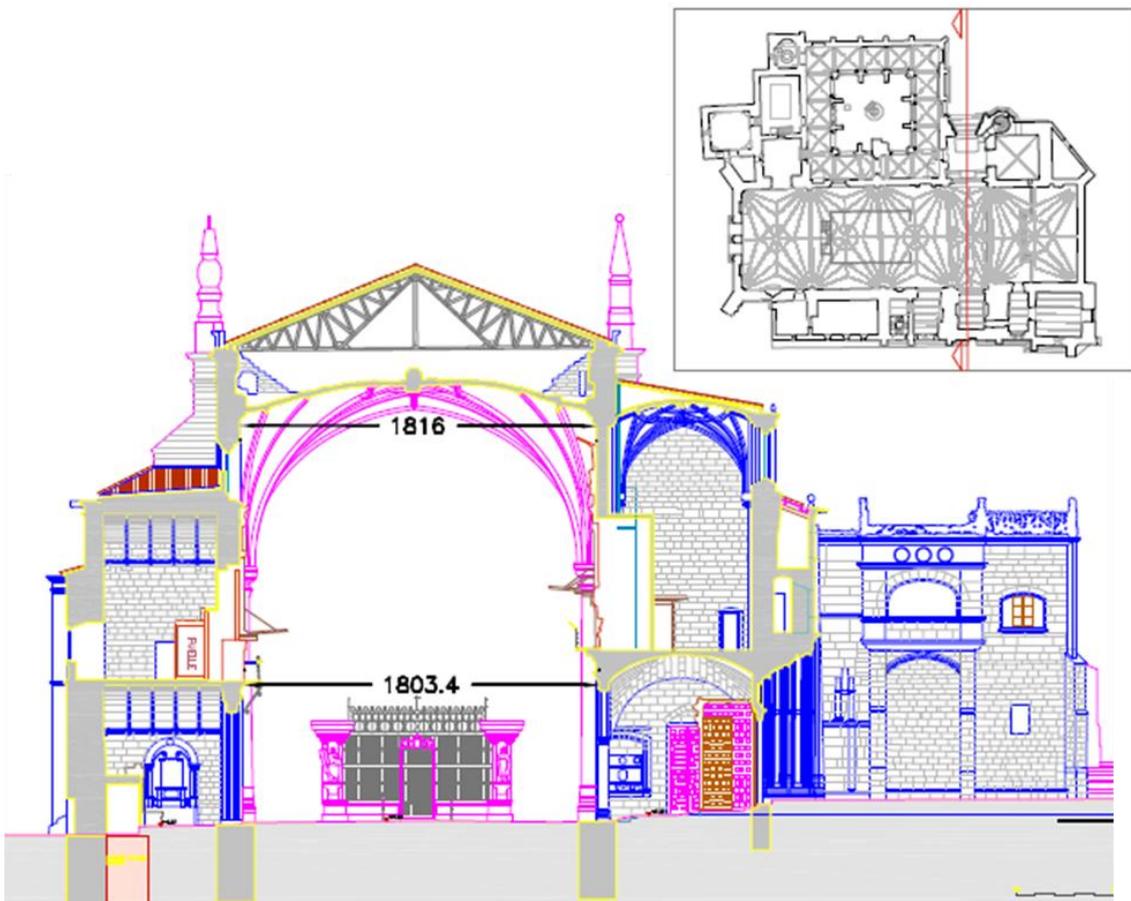


Figura 179.- Sección este ST1.

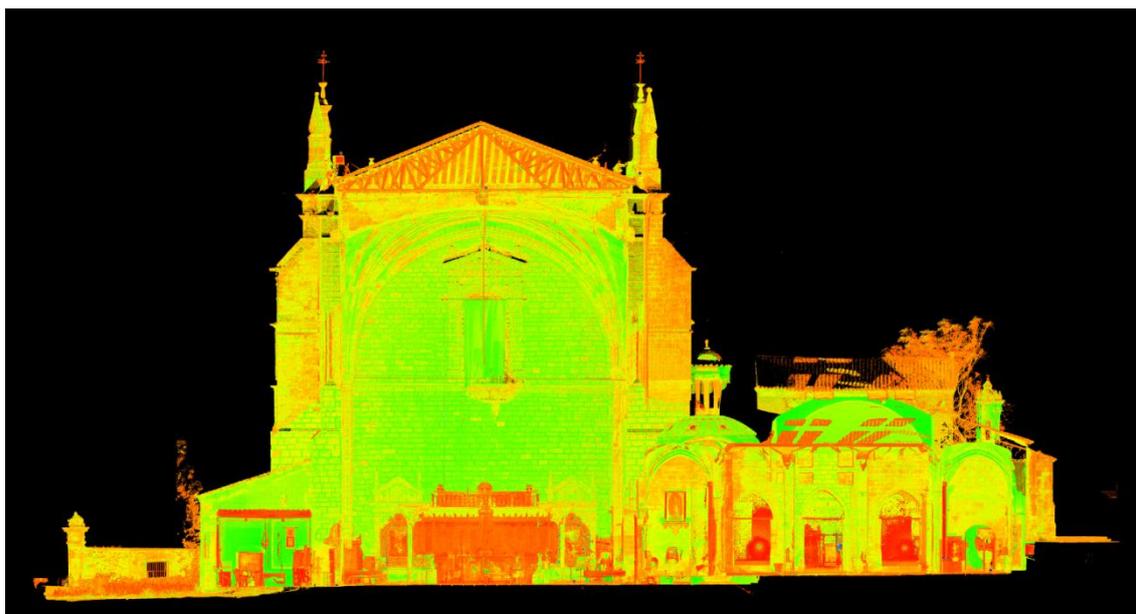


Figura 180.- Ortoimagen sección este ST2.

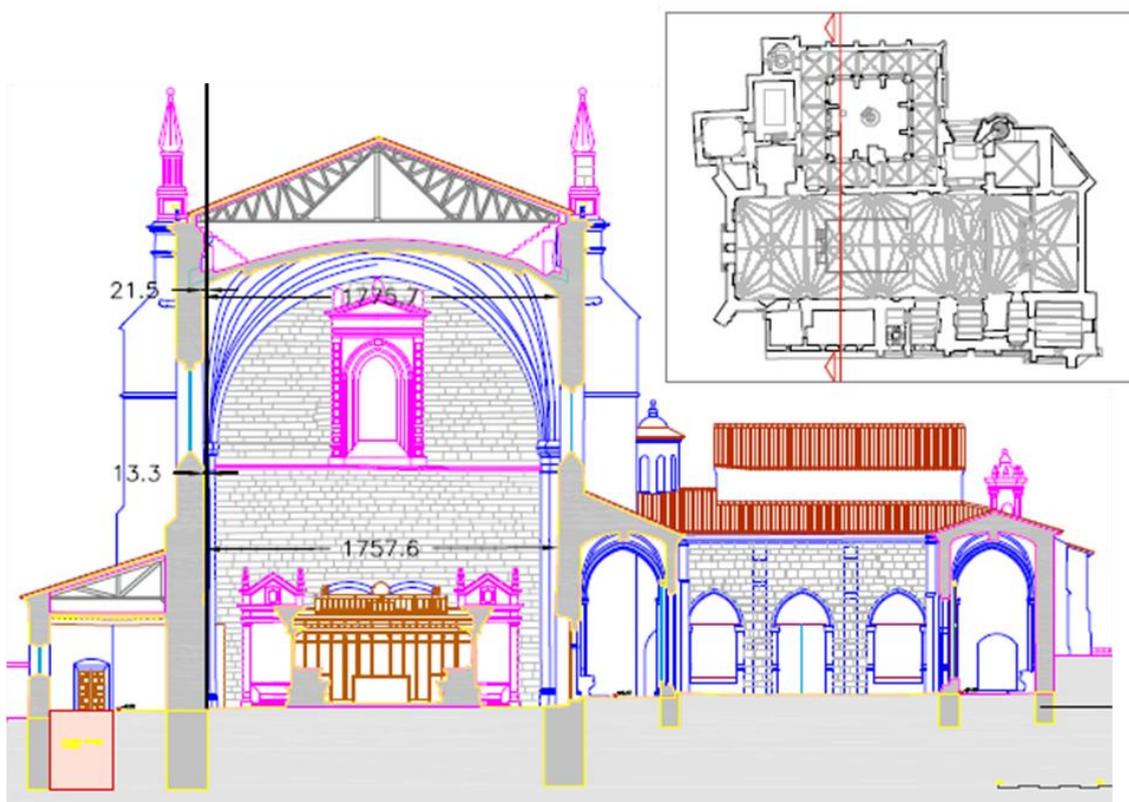


Figura 181.- Sección este ST2.



Figura 182.- Ortoimagen sección este ST3.

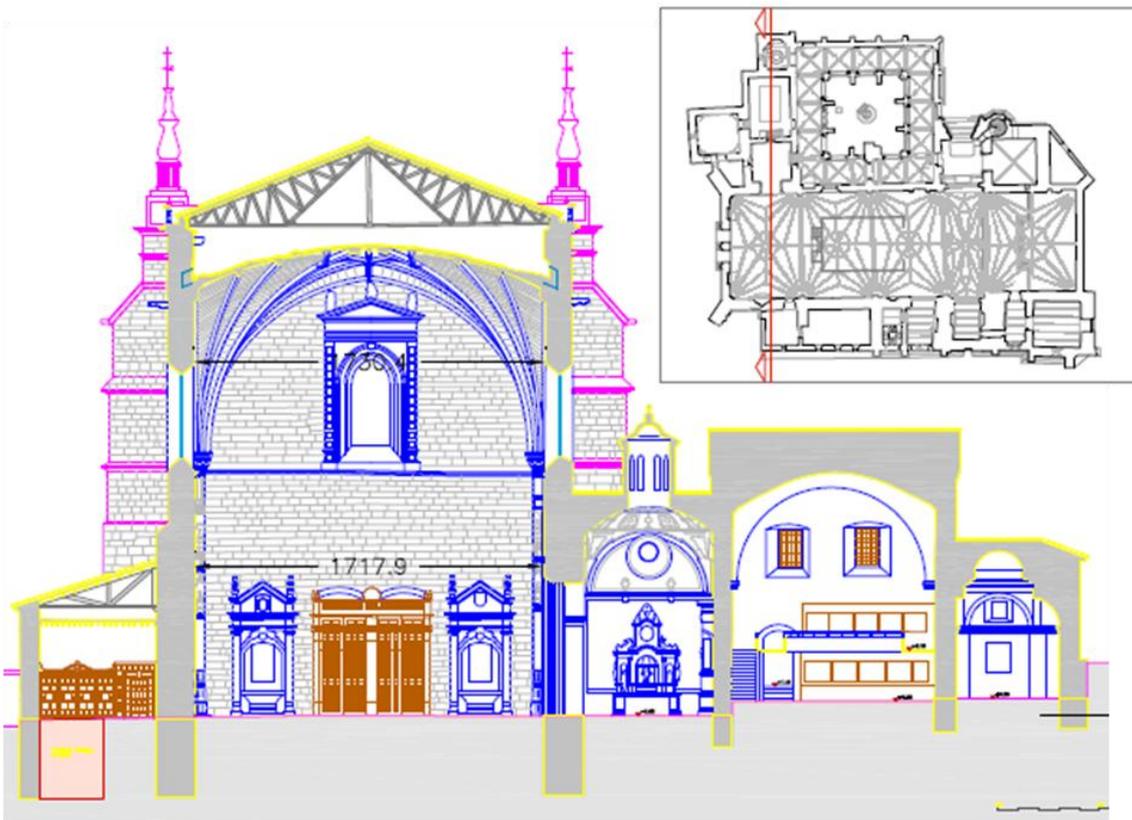


Figura 183.- Sección este ST3.

13.5.- Bóvedas.-

La figura 184 muestra la numeración de las bóvedas, y por donde se han realizado las secciones.

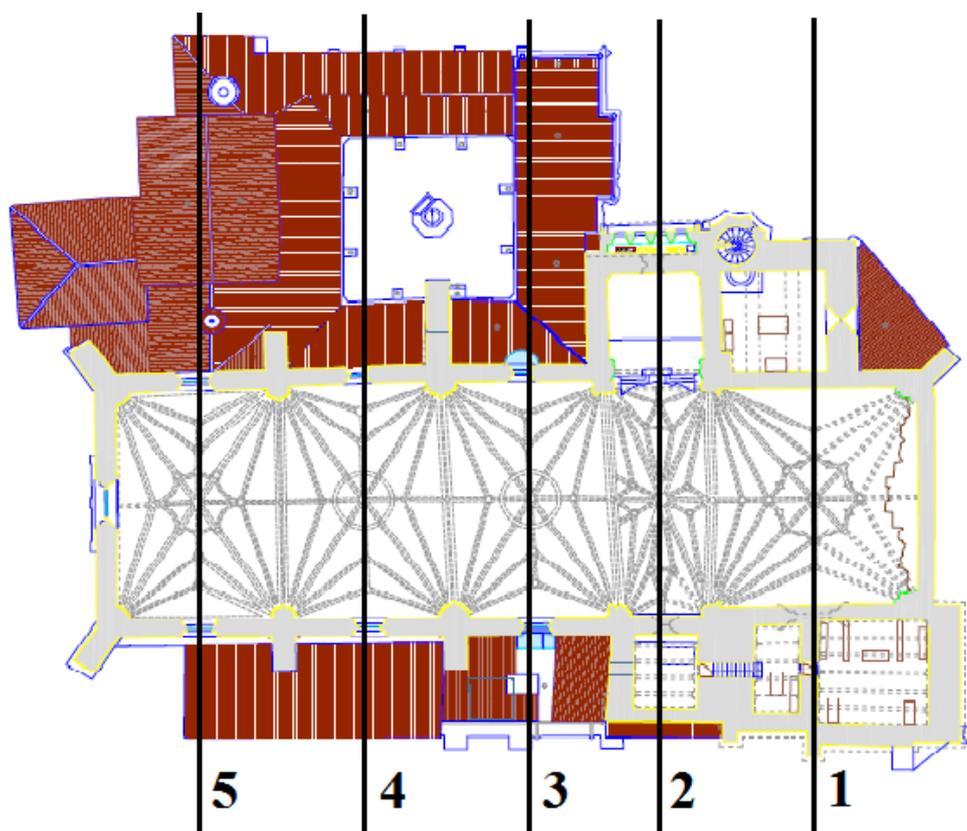


Figura 184.- Numeración de las bóvedas.

13.5.1.- Bóveda 1.-

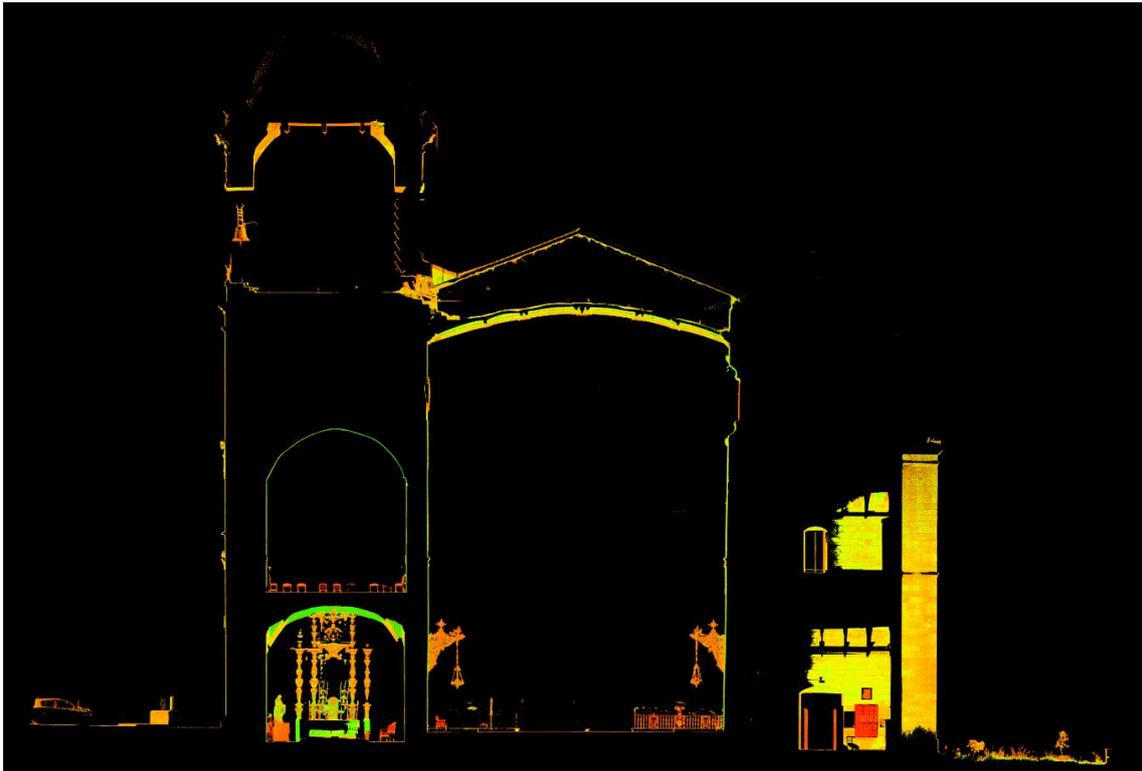


Figura 185.- Ortoimagen sección bóveda 1.

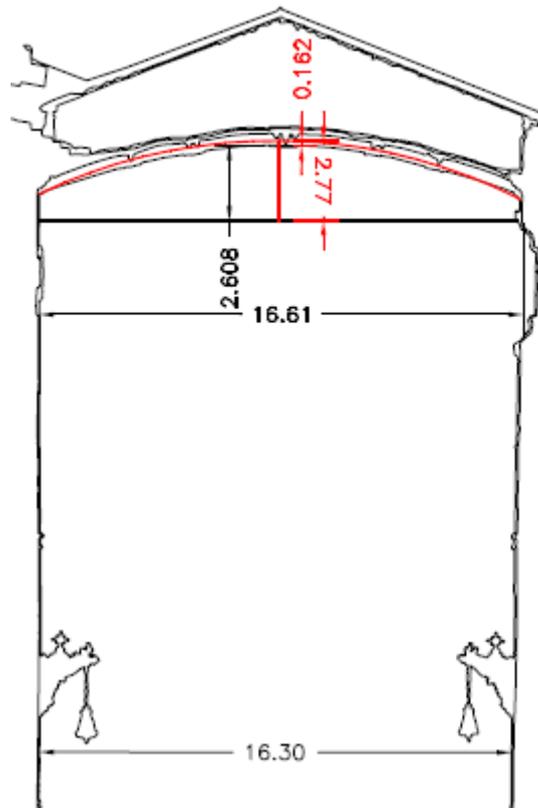


Figura 186.- Cálculo bóveda 1 con el método 1.

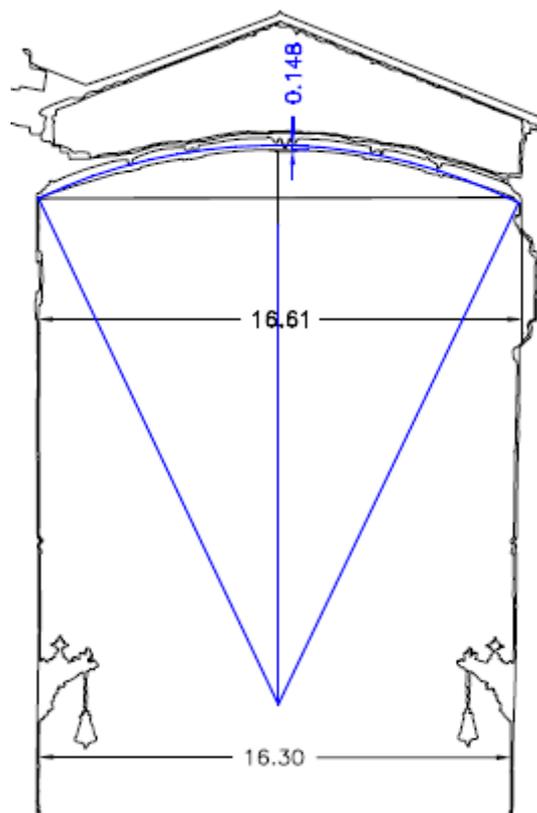


Figura 187.- Cálculo bóveda 1 con el método 2.

En la figura 186, se observa que al trazar un arco de medio punto con luz de 16.61 y dividiendo su diámetro en seis partes, el rebaje que muestra la bóveda responde de una manera casi exacta a $1/6$ de la luz presente en el vano (2.608 m). Teóricamente el vano mide 2.77 m y supone una diferencia entre la bóveda teórica y real de 16.2 cm. En ambos métodos los resultados son parecidos.

Respecto de los muros existe una falta de verticalidad de 31 centímetros. Se puede comparar con el alzado transversal (Figura 175).

13.5.2.- Bóveda 2.-

En esta bóveda hay que resaltar que la dimensión longitudinal, entendiéndose tal a la distancia que muestra la Catedral desde la fachada este a la fachada oeste, difiere de la anterior. Mientras que la bóveda 1 tiene una distancia longitudinal de 16.16 metros, la bóveda 2 adquiere un valor de 6.25. Esta disminución en el sentido longitudinal hace que la relación que adquiere la curvatura de la bóveda sea de $1/9$ (Figura 189).

En esta bóveda se ajusta mejor el primer método que el segundo.

La falta de verticalidad es de 13 centímetros, inferior a la bóveda anterior, posiblemente relacionada con sus menores dimensiones. Esto se puede apreciar en el alzado transversal (figura 179).

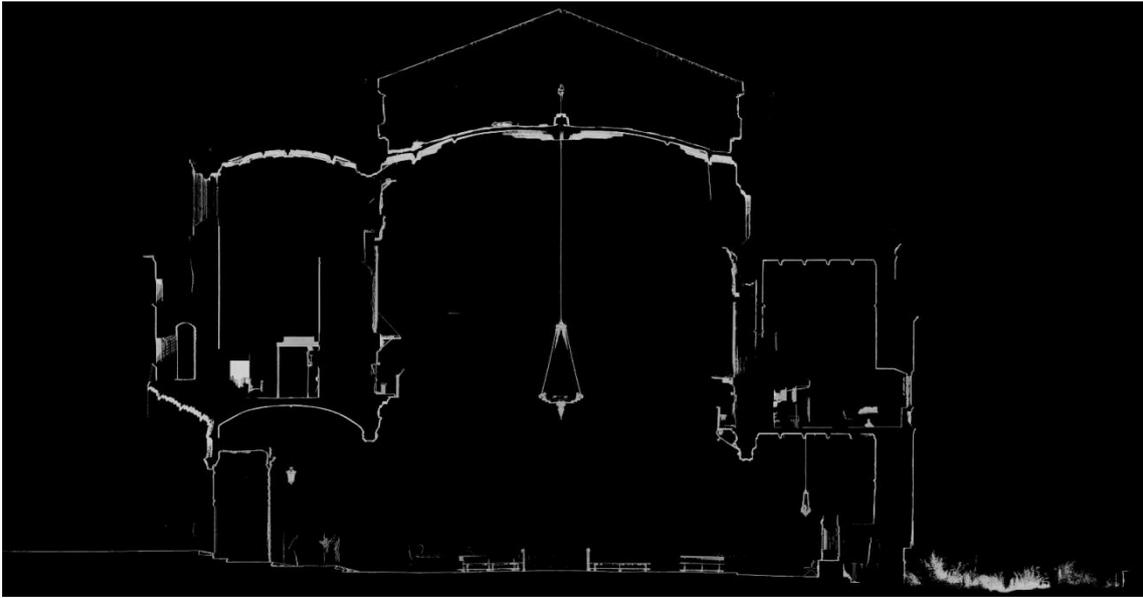


Figura 188.- Ortoimagen sección bóveda 2.

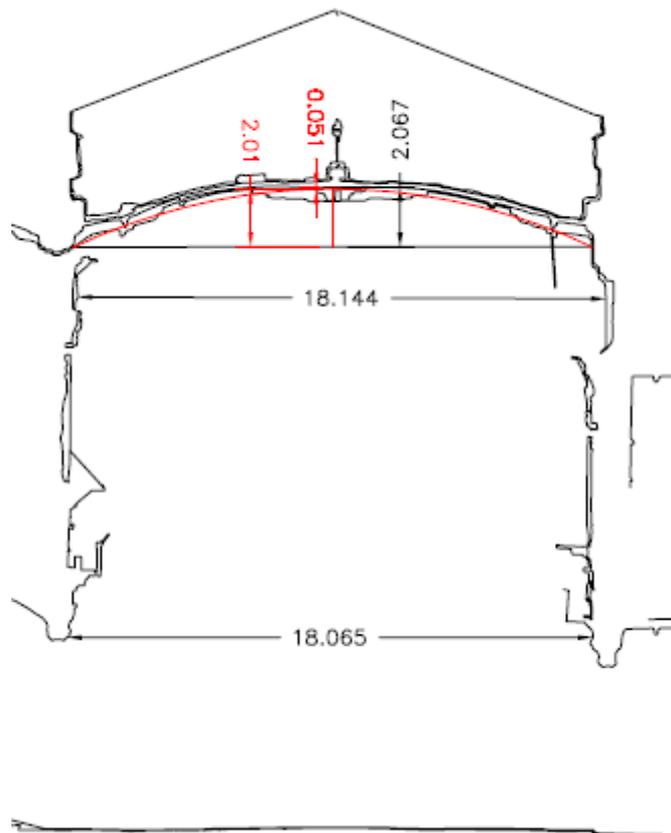


Figura 189.- Cálculo bóveda 2 con el método 1.

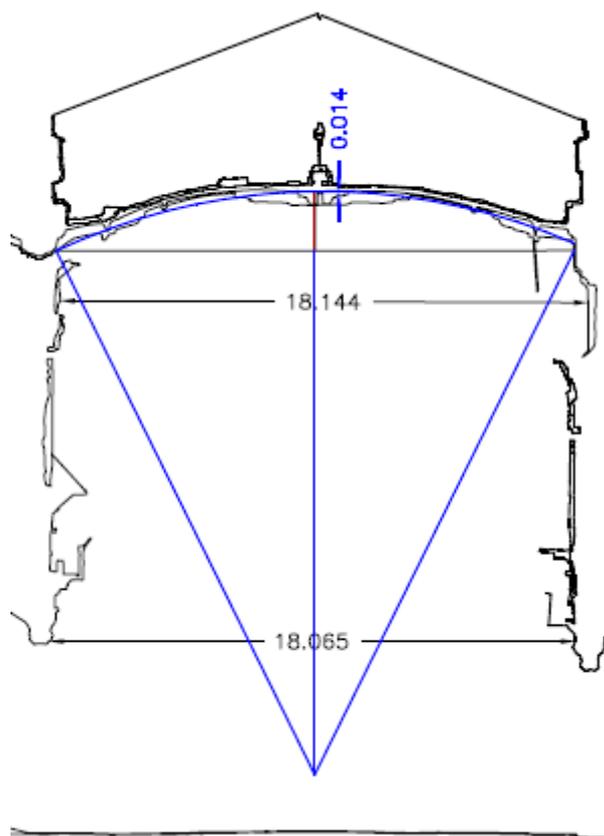


Figura 190.- Cálculo bóveda 2 con el método 2.

13.5.3.- Bóveda 3.-

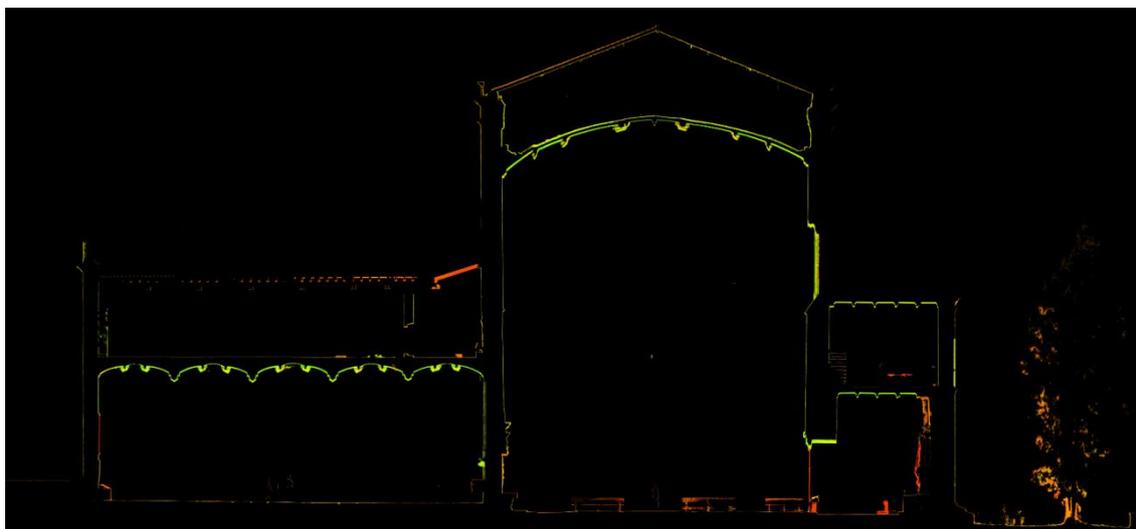


Figura 191.- Ortoimagen sección bóveda 3.

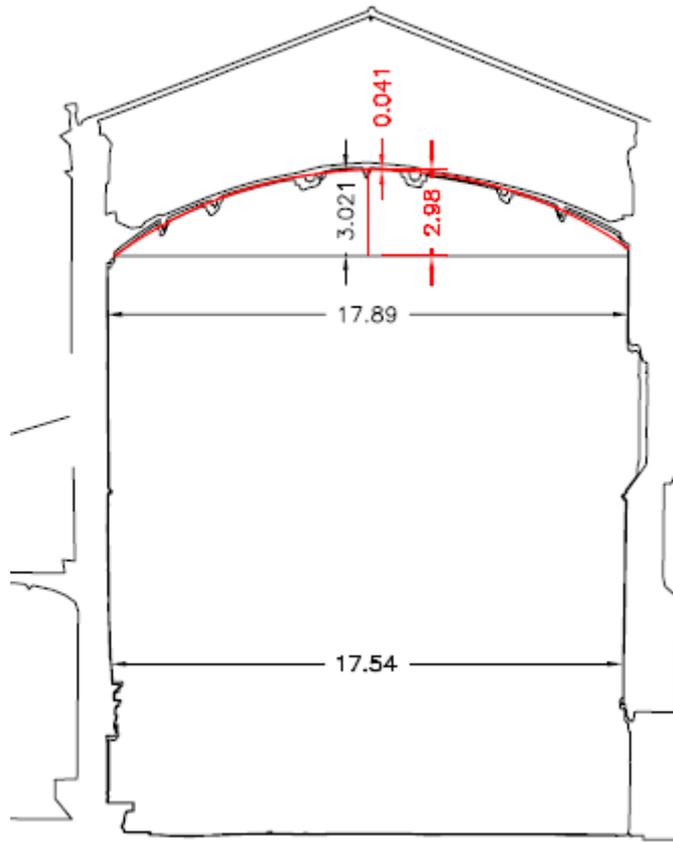


Figura 192.- Cálculo bóveda 3 con el método 1.

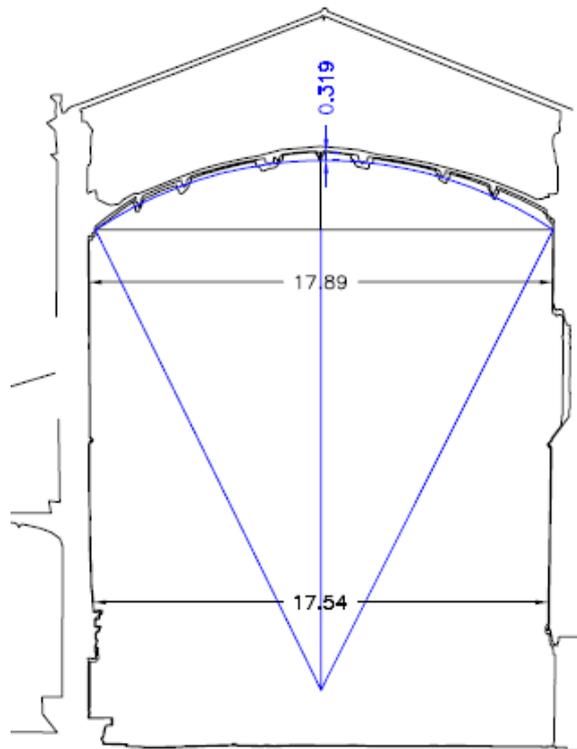


Figura 193.- Cálculo bóveda 3 con el método 2.

Al igual que las bóvedas anteriores, en ésta se ajusta mejor el primer método. Existe una diferencia de 4 centímetros entre el vano teórico y el real y la relación entre la luz del vano y el diámetro es de $1/6$.

Es la bóveda que tiene una mayor falta de verticalidad con una diferencia de 35 centímetros.

El alzado transversal se ajusta perfectamente a estas medidas (Figuras 171 y 173).

13.5.4.- Bóveda 4.-

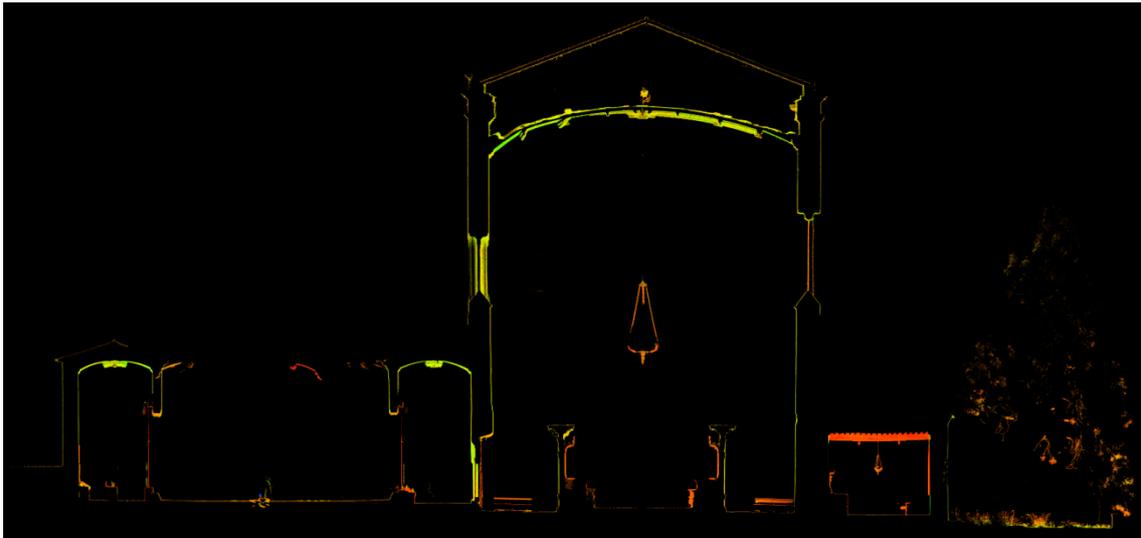


Figura 194.- Ortoimagen sección bóveda 4.

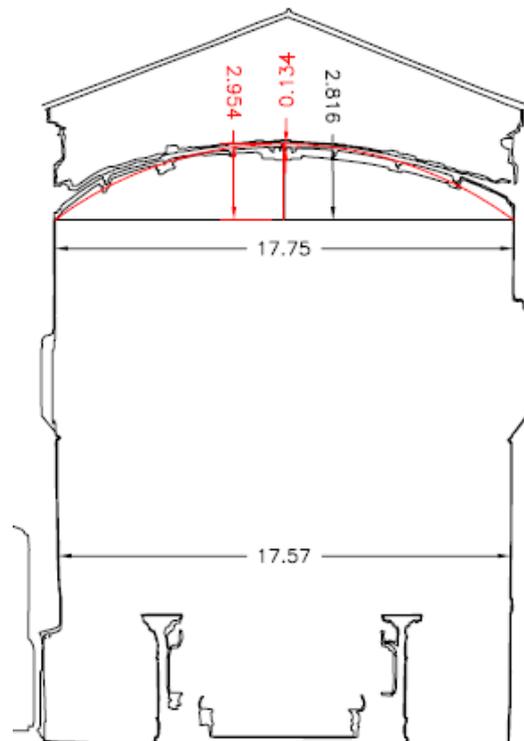


Figura 195.- Cálculo bóveda 4 con el método 1.

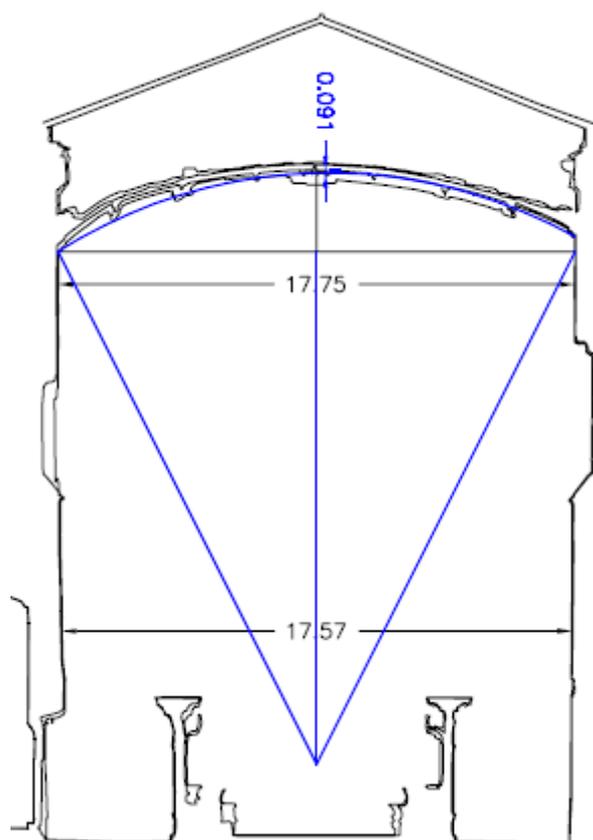


Figura 196.- Cálculo bóveda 4 con el método 2.

La relación entre la luz del vano y el diámetro es de $1/6$, siendo el segundo método más ajustado que el primero, aunque con resultados parecidos.

La falta de verticalidad es de 18 centímetros. Se pueden comparar con el alzado transversal (Figura 181).

13.5.5.- Bóveda 5.-

En esta bóveda la relación entre la luz del vano y el diámetro es de $1/9$, como la segunda bóveda. Los dos métodos se ajustan bastante bien a la bóveda, con una variación mínima entre la bóveda teórica y la bóveda real.

La desviación vertical es junto con la de la bóveda 2 de las más reducidas, con 12 centímetros. La figura 183 del alzado transversal presenta mejor este dato.

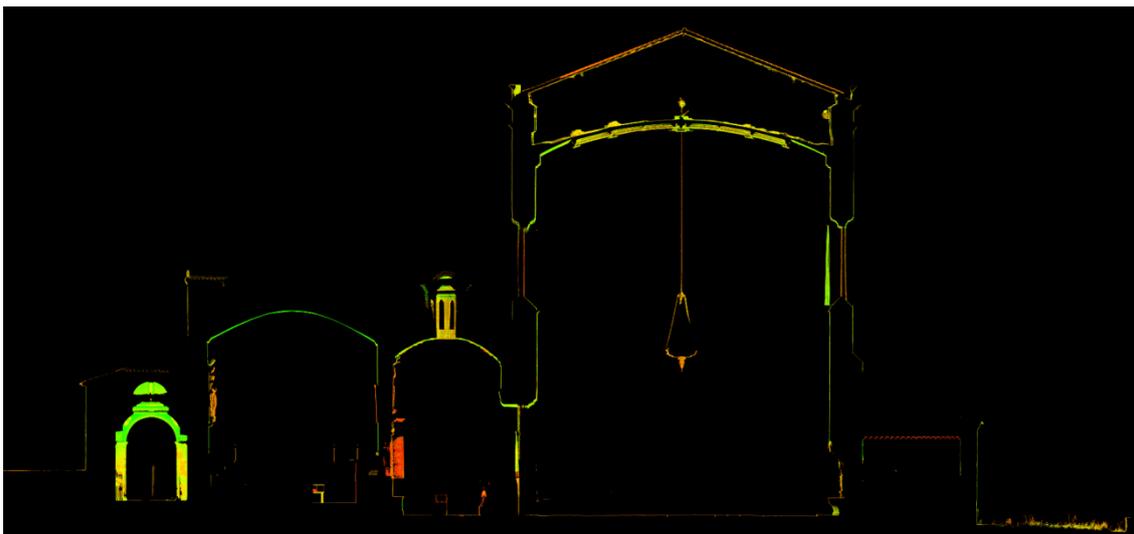


Figura 197.- Ortoimagen sección bóveda 5.

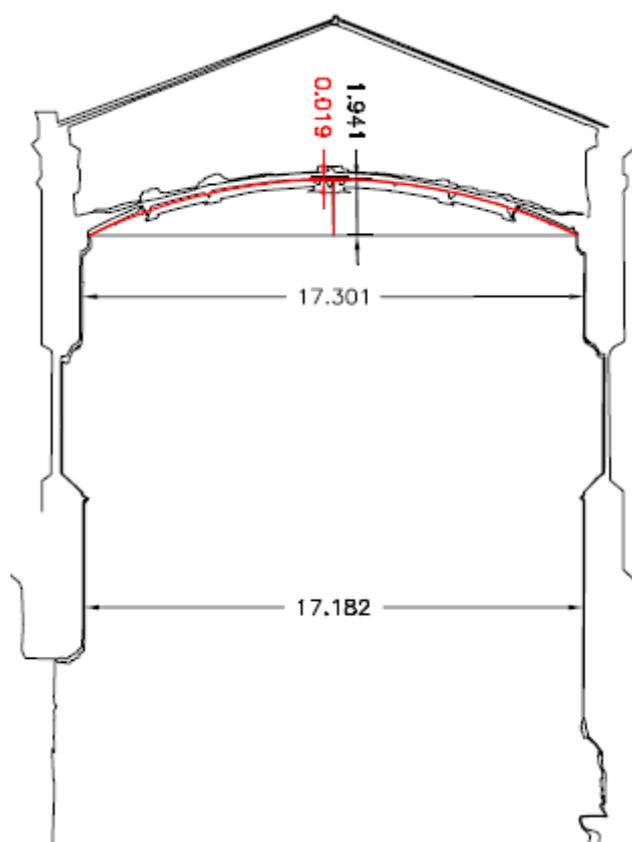


Figura 198.- Cálculo bóveda 5 con el método 1.

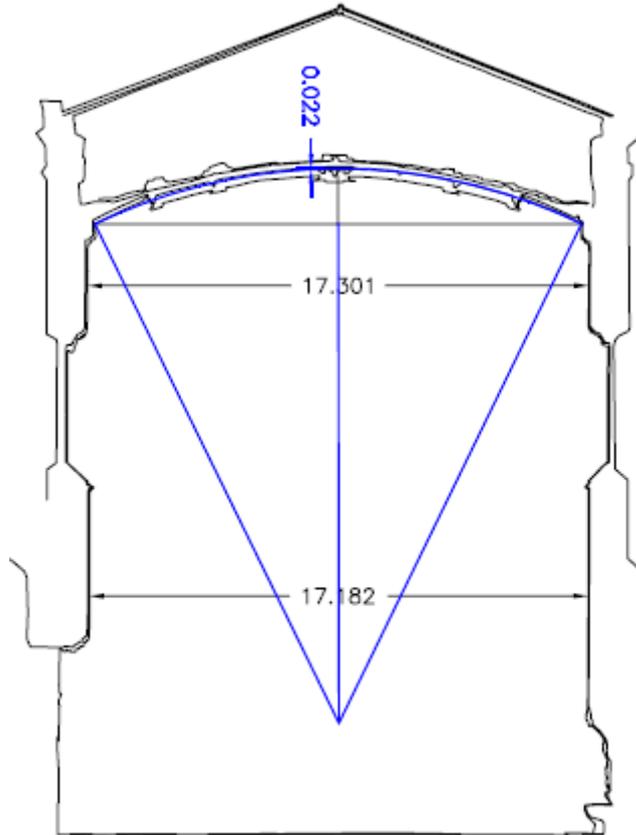


Figura 199.- Cálculo bóveda 5 con el método 2.

13.6.- Topografía de las bóvedas.-

En este apartado se va a realizar una comparación entre la topografía de las bóvedas teóricas y las reales. En primer lugar se calcula la topografía de las bóvedas teóricas. El procedimiento empleado para ello es el siguiente:

1.- Del levantamiento tridimensional realizado por el láser escáner se obtiene un primer plano en Autocad de las bóvedas. Sobre ellas se eliminan aquellos errores que pudieran tener para que las bóvedas sean perfectas geoméricamente.

2.- Obtenida la geometría de la bóveda, el siguiente paso es obtener la cota de sus puntos. Esto se consigue realizando un abatimiento de la figura. Como la bóveda es simétrica calculando las cotas de un cuadrante obtenemos la cota de la bóveda completa. Se procede de la siguiente manera:

- a.- Se dibuja la diagonal AB, y sobre ella se abaten todos los puntos.
- b.- Una vez abatidos se proyectan perpendicularmente todos los puntos sobre la circunferencia (EF Figura 200). Suponiendo que los puntos A y B tienen cota cero, la cota de los puntos es la longitud de su proyección, es decir, desde su abatimiento hasta que cortan la circunferencia.

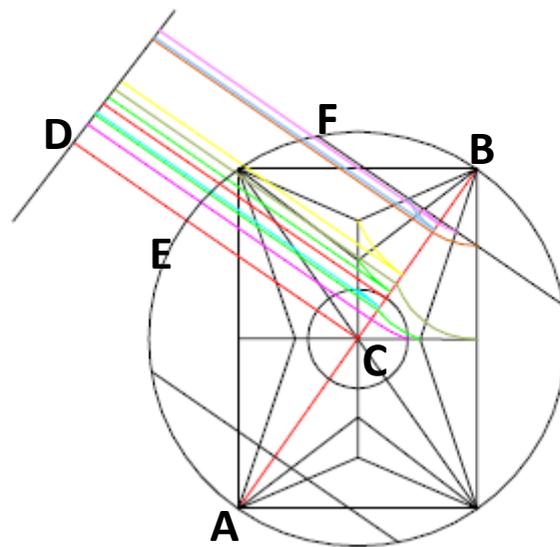


Figura 200.- Procedimiento geométrico para el cálculo de cotas en una bóveda.

El resultado de obtener las cotas es un mapa topográfico de las bóvedas, que se puede observar en la figura 201:

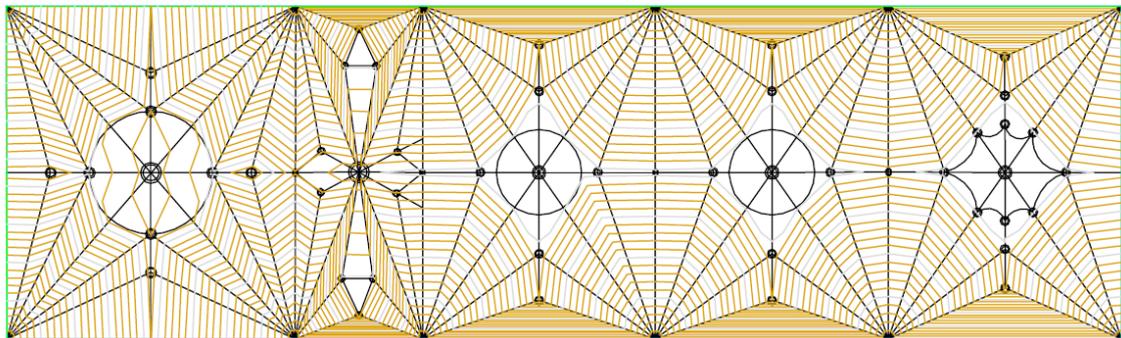


Figura 201.- Topografía teórica de las bóvedas.

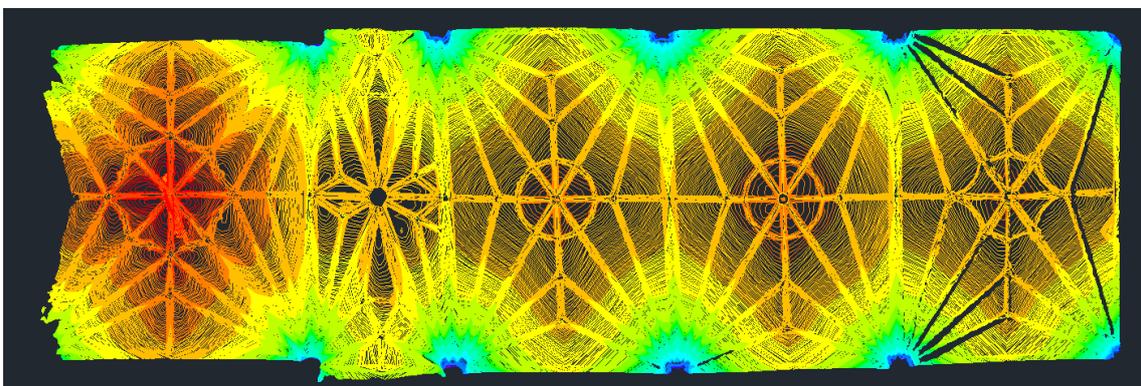


Figura 202.- Topografía real de las bóvedas. Intradós.

En las figura 202 y 203 se puede ver la topografía real de las bóvedas. La comparación con la topografía teórica de las bóvedas aporta poco puesto que el diseño de la teórica

parte del abatimiento de una serie muy limitada de puntos y la topografía real se obtiene de una nube de millones de puntos. Sin embargo, de la observación de la topografía real y del estudio geométrico de las bóvedas realizado anteriormente se puede aportar:

- 1.- Las bóvedas 2 y 5, que en la topografía real parece ser que son las que mejor simetría guardan, son también las que al aplicar los dos métodos de construcción de bóvedas tienen menor error.
- 2.- La bóveda 1 y sobre todo la 4, son las que más deformaciones presentan y también son las que en el estudio geométrico más se apartan del modelo teórico.

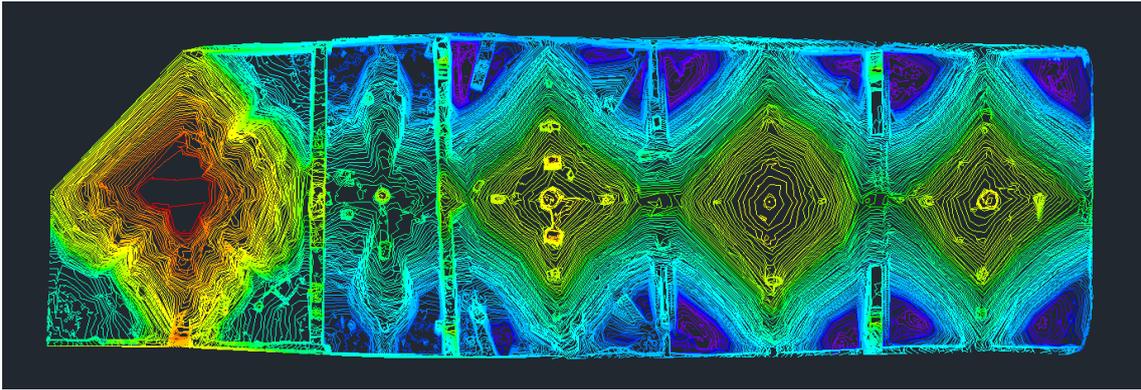


Figura 203.- Topografía real de las bóvedas. Extradós.

V PARTE: CONCLUSIONES

14.- Conclusiones.-

14.1.- Conclusiones particulares.-

Del estudio patológico de la estructura y la cimentación de la Catedral de Coria se deduce lo siguiente:

1.- En la red de control posicional tridimensional, el indicador de la calidad de las coordenadas ajustadas en todos los casos es de 2 ó 3 mm para las coordenadas planimétricas, y en altimetría la diferencia de datos es de 1 mm. Teniendo en cuenta que el año 2012 fue un año muy seco y el año 2013 muy lluvioso, dos escenarios muy distintos, y con toma de datos en ambos años, se puede afirmar que al terreno donde se asienta la Catedral no se mueve. Los datos registrados en 2014 confirman las conclusiones obtenidas.

2.- En la situación normal actual, es decir, sin saturarse las terrazas y sin la acción de ningún sismo, el talud próximo a la fachada sur de la Catedral es estable. Se podría decir que las grietas podrían estar provocadas por un posible asiento diferencial debido a la mala disposición de la Catedral sobre un terreno arcilloso con una pequeña cantidad de terrazas a nivel superficial. Además, la Catedral se encuentra muy próxima al borde de un talud de altura considerable y, probablemente, el terremoto de Lisboa de 1755 terminó por desequilibrar y con ello comenzó la aparición de dichas grietas.

3.- Con el levantamiento tridimensional de la Catedral se identifican un total de 23 grietas con las siguientes características:

Grietas en la fachada este de la Catedral (Figura 204):



Figura 204.- Grietas de la fachada este de la Catedral.

Grieta nº 1: Situada en la parte inferior izquierda de la fachada este de la Catedral con una longitud de 6,437 m y una anchura máxima de 8,2 cm.

Grieta nº 2: Situada en la parte izquierda de la fachada este de la Catedral con una longitud de 24,322 m y una anchura máxima es de 10,1 cm.

Grieta nº 3: Situada en la parte superior central de la fachada este de la Catedral con una longitud de 8,066 m y una anchura máxima es de 4,8 cm.

Grieta nº 4: Situada en la parte superior derecha de la fachada este de la Catedral con una longitud de 14,235 m y una anchura máxima es de 8,8 cm.

Grieta nº 5: Situada en la parte inferior derecha de la fachada este de la Catedral con una longitud de 9,219 m y una anchura máxima de 6,2 cm.

Grietas de las bóvedas (Figura 205):

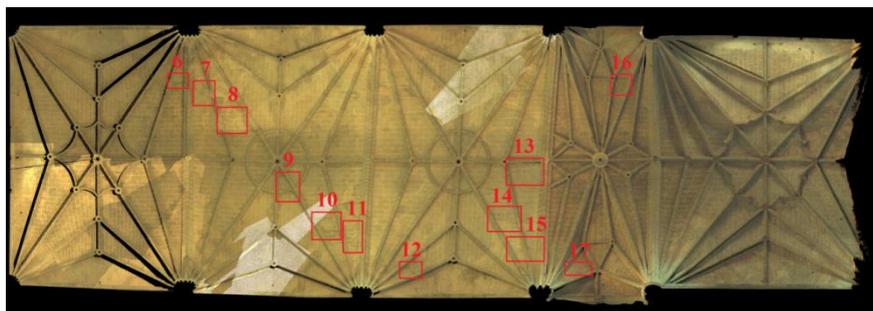


Figura 205.- Grietas de las bóvedas de la Catedral.

- Grieta nº 6: Bóveda nº 5. La longitud es de 0,709 m y la anchura máxima es de 2,2 cm.
Grieta nº 7: Bóveda nº 4. La longitud es de 2,04 m y la anchura máxima es de 2,5 cm.
Grieta nº 8: Bóveda nº 4. La longitud es de 2,116 m y la anchura máxima es de 1,2 cm.
Grieta nº 9: Bóveda nº 4. La longitud es de 1,406 m y la anchura máxima es de 2,4 cm.
Grieta nº 10: Bóveda nº 4. La longitud es de 1,445 m y la anchura máxima es de 2,1 cm.
Grieta nº 11: Bóveda nº 4. La longitud es de 1,118 m y la anchura máxima es de 1,1 cm.
Grieta nº 12: Bóveda nº 3. La longitud es de 0,785 m y la anchura máxima es de 5,8 cm.
Grieta nº 13: Bóveda nº 3. La longitud es de 2,381 m y la anchura máxima es de 1,6 cm.
Grieta nº 14: Bóveda nº 3. La longitud es de 1,894 m y la anchura máxima es de 3,2 cm.
Grieta nº 15: Bóveda nº 3. La longitud es de 0,725 m y la anchura máxima es de 2,6 cm.
Grieta nº 16: Bóveda nº 2. La longitud es de 1,242 m y la anchura máxima es de 2,2 cm.
Grieta nº 17: Bóveda nº 2. La longitud es de 1,442 m y la anchura máxima es de 2,9 cm.

Grietas del interior de la Catedral (Figuras 206 y 207):



Figura 206.- Grietas en el interior de la Catedral.

- Grieta nº 18: Situada en la parte izquierda, debajo de la bóveda 1, de la cara sur de la Catedral. Junto al retablo. La longitud de ésta es 3,929 m y la anchura máxima es de 9,9 cm.
Grieta nº 19: Situada en la parte central, debajo de la bóveda 1, de la cara sur de la Catedral. Junto al retablo. La longitud de ésta es 4,251 m y la anchura máxima es de 7,8 cm.
Grieta nº 20: Situada en la parte derecha, debajo de la bóveda 1, de la cara sur de la Catedral. Junto al retablo. La longitud de ésta es 5,619 m y la anchura máxima es de 5,9 cm.

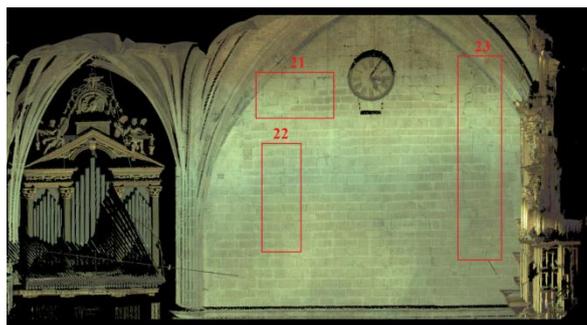


Figura 207.- Grietas en el interior de la Catedral.

Grieta nº 21: Situada en la parte izquierda, debajo de la bóveda 1, de la cara norte de la Catedral. Junto al retablo. La longitud de ésta es 3,347 m y la anchura máxima es de 4,6 cm.

Grieta nº 22: Situada en la parte izquierda, debajo de la bóveda 1, de la cara norte de la Catedral. Junto al retablo. La longitud de ésta es 2,965 m y la anchura máxima es de 2,6 cm.

Grieta nº 23: Situada en la parte derecha, debajo de la bóveda 1, de la cara norte de la Catedral. Junto al retablo. La longitud de ésta es 6,253 m y la anchura máxima es de 4,9 cm.

4.- Del estudio termográfico se constata la aparición de humedades en las cuatro dependencias del archivo catedralicio (Figuras 208, 209, 210 y 211):

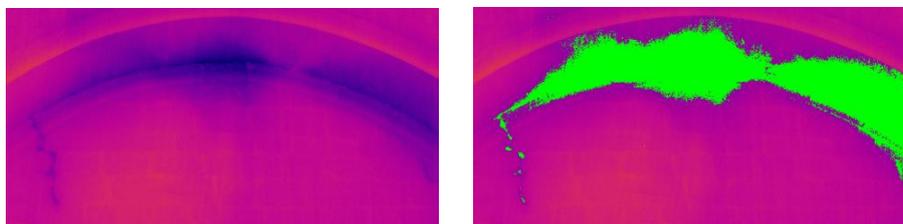


Figura 208.- Sala del Archivo: termografía y termografía.
Sala del Archivo: termografía y termografía tratada con el programa informático.

- La superficie de la humedad en la Sala del Archivo es de 0,326 m².

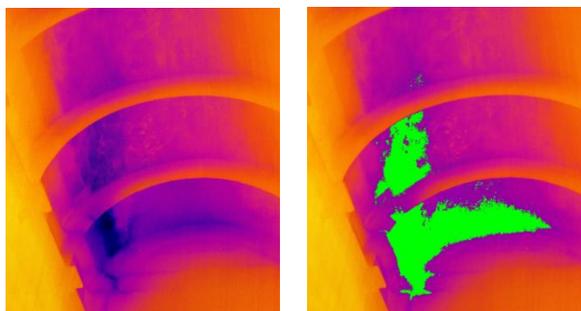


Figura 209.- Antesala del Archivo: termografía y termografía.
Antesala del Archivo: termografía y termografía tratada con el programa informático.

- La superficie de la humedad en la Antesala del Archivo es de 1,266 m².

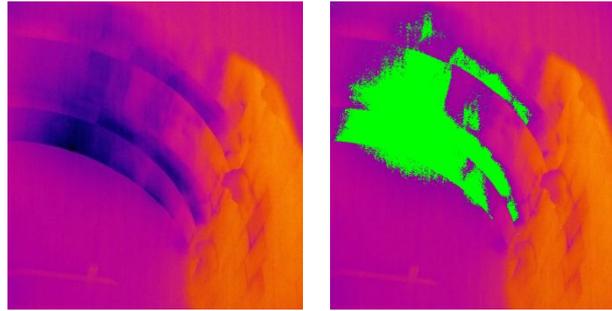


Figura 210.- Sala del Órgano: termografía y termografía.
Sala del Órgano: termografía y termografía tratada con el programa informático.

- La superficie de la humedad en la Antesala del Órgano es de 2,479 m².

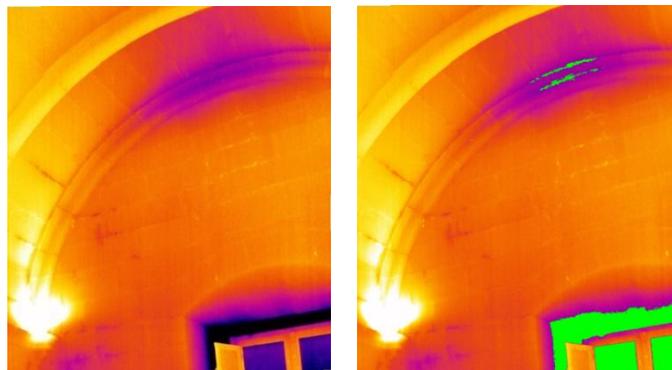


Figura 211.- Sala de entrada al Cuerpo del Archivo: termografía y termografía.
Sala de entrada al Cuerpo del Archivo: termografía y termografía tratada con el programa informático.

- La superficie de la humedad en la Sala de entrada al Cuerpo del Archivo es de 0,326 m².

5.- El estudio geométrico de la Catedral es realizado desde el punto de vista de las desviaciones verticales y de las deformaciones de las bóvedas a partir de las ortoimágenes obtenidas con la técnica del láser escáner. Éstas, muestran falta de verticalidad en todos los tramos de la nave:

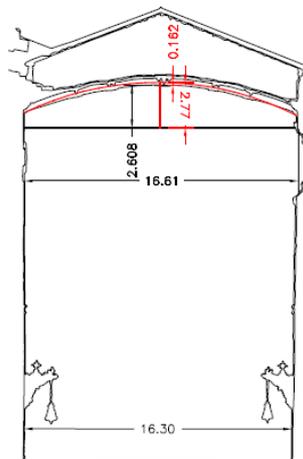


Figura 212.- Bóveda 1.

Conclusiones

- El vano de la bóveda 1 tiene una diferencia respecto al vano teórico de 16,2 centímetros. En los muros existe una falta de verticalidad de 31 centímetros (Figura 212).

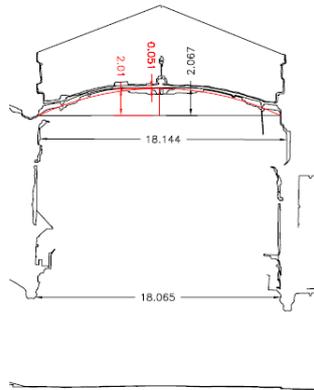


Figura 213.- Bóveda 2.

- El vano de la bóveda 2 tiene una diferencia respecto al vano teórico de 5,1 centímetros. En los muros existe una falta de verticalidad de 8 centímetros (Figura 213).

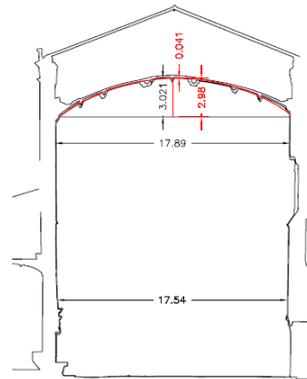


Figura 214.- Bóveda 3.

- El vano de la bóveda 3 tiene una diferencia respecto al vano teórico de 4,1 centímetros. En los muros existe una falta de verticalidad de 35 centímetros (Figura 214).

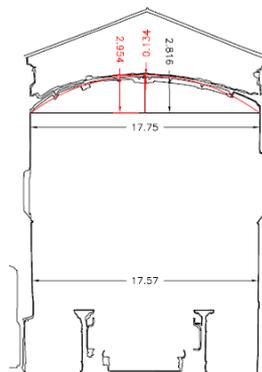


Figura 215.- Bóveda 4.

- El vano de la bóveda 4 tiene una diferencia respecto al vano teórico de 13,4 centímetros. En los muros existe una falta de verticalidad de 18 centímetros (Figura 215).

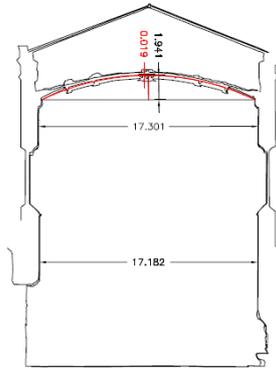


Figura 216.- Bóveda 5.

- El vano de la bóveda 5 tiene una diferencia respecto al vano teórico de 2 centímetros. En los muros existe una falta de verticalidad de 12 centímetros (Figura 216).

6.- De la observación de la topografía real y del estudio geométrico de las bóvedas se puede aportar que (Figura 217):

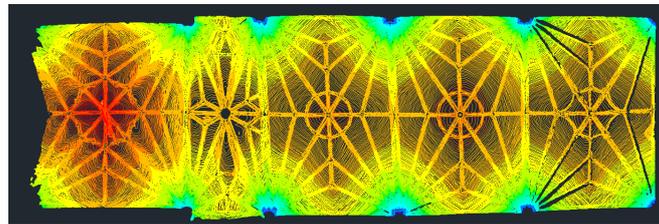


Figura 217.- Topografía real de las bóvedas.

- Las bóvedas 2 y 5, indican que en la topografía real parece ser que son las que mejor simetría guardan, son también las que al aplicar los dos métodos de construcción de bóvedas tienen menor error.
- La bóveda 1 y sobre todo la 4, son las que más deformaciones presentan y también son las que en el estudio geométrico más se apartan del modelo teórico.

14.2.- Conclusiones generales.-

La acción del tiempo hace mella en el patrimonio histórico. Esto se manifiesta mediante múltiples anomalías como son las grietas o las humedades.

La combinación de técnicas geodésicas y geotécnicas para comprobar si donde se asienta la Catedral se mueve, se ha revelado como un procedimiento válido para posteriores trabajos de naturaleza similar.

Las técnicas no destructivas, láser escáner y termografía, son unas técnicas muy adecuadas para la documentación y preparación de un plan preventivo que haga posible

diagnosticar cuales son las patologías que sufre el edificio, y cuáles son las medidas correctoras a adoptar para subsanar estas deficiencias.

La presente tesis doctoral ha puesto en práctica una metodología de trabajo en la que se ha podido constatar, que el láser escáner es capaz de efectuar levantamientos topográficos de una forma rápida y con una precisión muy buena. Este levantamiento ha generado un modelo tridimensional que ha permitido modelar la estructura de la Catedral e identificar los fallos estructurales que se han producido, como son las grietas. Además ha generado planos en dos dimensiones que han servido para representar la geometría real de la Catedral, y se ha podido estudiar las desviaciones verticales producidas, así como las deformaciones de las bóvedas. Quedando abierto el estudio de cálculos estructurales para otras disciplinas.

También esta tesis doctoral ha puesto en práctica una metodología de trabajo que ha integrado el modelo tridimensional generado por el láser escáner con la técnica termográfica. El resultado ha sido excelente, permitiendo detectar, situar y cuantificar en la estructura de la Catedral aquellas humedades que se habían producido. Además, el programa informático que se ha implementado permite confirmar y contrastar mediante umbrales la información de las humedades recogida por las termografías, y también mediante la barra de desplazamiento visualizar las isoterma.

La combinación de las técnicas de láser escáner y termografía han sido una herramienta insustituible para realizar el análisis estructural de la Catedral.

Por último, es importante recalcar que con las técnicas y procedimientos aquí desarrollados, lo que se ha realizado es un estudio patológico de la estructura y cimentación de la Catedral, el diagnóstico y las posibles soluciones a los deterioros aparecidos es materia destinada a otras disciplinas.

14.3.- Futuras líneas de actuación.-

El futuro del trabajo conjunto de las técnicas de láser escáner y termografías aplicadas al patrimonio histórico tendrá que ser interdisciplinar, puesto que estas técnicas solamente presentan las patologías de los edificios, pero nunca por sí solas dan diagnósticos, ni presentan acciones para paliar las deficiencias encontradas. Son las disciplinas competentes en estos menesteres las que deberán realizar, previo estudio de las patologías, aquellos diagnósticos para poder implementar las acciones conducentes a la restauración o rehabilitación del monumento o edificio.

Esta tesis doctoral puede servir como referencia a posteriores trabajos de la misma índole, es decir, estudios patológicos en la estructura de edificios y monumentos del patrimonio histórico. Estos estudios están enfocados al empleo de métodos no destructivos que sean compatibles con los utilizados en esta tesis doctoral, como: la fotografía documental, análisis digital de imagen, radiografía, técnicas de pulsos ultrasónicos, difracción de rayos-x portable, microscopia electrónica,... Por tanto, las futuras líneas de investigación pueden ir encaminadas a la conjunción de las técnicas no destructivas para la documentación de patologías de monumentos. Al igual que se han empleado en esta tesis doctoral (termografía y láser escáner), pueden desarrollarse otras técnicas, unidas al láser escáner para la obtención tridimensional de las patologías.

A medida que avance la tecnología, se irá perfeccionando la técnica aplicada en esta tesis doctoral, por ejemplo el instrumental empleado en esta tesis nos muestra un error en la medición posicional del punto de 6 mm. Actualmente, ya se comercializan láser escáner con las mismas prestaciones que el equipo empleado en esta tesis, pero con un error posicional de 2 mm. Esto nos indica, que en el futuro podrá hacerse investigaciones con mejor calidad que la actual, incluso donde los instrumentos podrán incorporar prestaciones que hasta ahora no se disponen. Por ejemplo, podría incorporarse la opción de fotografías térmicas junto con la toma de datos con el láser escáner.

15.- Conclusions.-

15.1.- Particular Conclusions.-

From the pathological study of the structure and foundations of Coria Cathedral the following can be concluded:

1.- In the three-dimensional positional monitoring network, the quality indicator for the coordinates fitted is, in all cases, 2 or 3 mm for planimetric coordinates, with minimal and acceptable errors, and in altimetry the data difference is 1 mm. Taking into account that 2012 was a very dry year and 2013 very rainy, two very different scenarios in both of which data were collected, it can be confirmed that the land on which the cathedral stands does not move.

2.- In the current normal situation, i.e. in the absence of the saturation of the terraces nor earthquakes, the slope near the south façade of the cathedral is stable. The cracks might be described as being caused by a possible differential base owing to the poor placement of the cathedral on clay with a small quantity of terraces at the surface level. Moreover, the cathedral is very close to the edge of a slope of considerable height, and the Lisbon earthquake of 1755 probably upset its balance and led to the appearance of the cracks.

3.- The three-dimensional survey of the cathedral has identified a total of 23 cracks, with the following characteristics:

Cracks in the eastern façade of the cathedral (Figure 218):



Figure 218.- Cracks in the eastern façade of the cathedral.

Crack nº 1: Lower left of eastern façade, length 6.437 m, maximum width 8.2 cm.

Crack nº 2: Left side of eastern façade, length 24.322 m, maximum width 10.1 cm.

Crack nº 3: Upper centre of eastern façade, length 8.066 m, maximum width 4.8 cm.

Crack nº 4: Upper right of eastern façade, length 14.235 m, maximum width 8.8 cm.

Crack nº 5: Lower right of eastern façade, length 9.219 m, maximum width 6.2 cm.

Cracks in the domes (Figure 219):

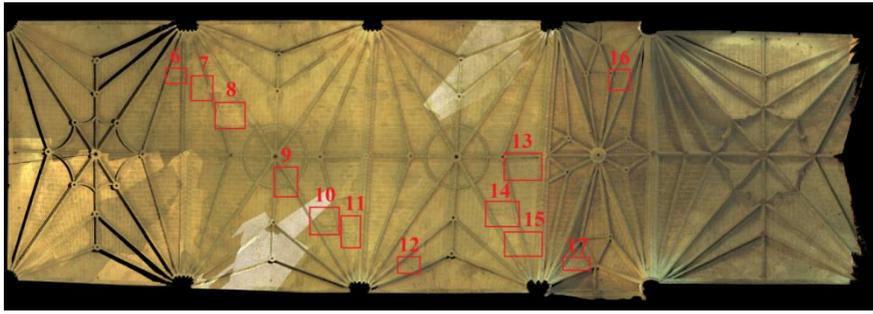


Figure 219.- Cracks in the domes of the cathedral.

- Crack n° 6: Dome n°5, length 0.709 m, maximum width 2.2 cm.
Crack n° 7: Dome n°4, length 2.04 m, maximum width 2.5 cm.
Crack n° 8: Dome n°4, length 2.116 m, maximum width 1.2 cm.
Crack n° 9: Dome n°4, length 1.406 m, maximum width 2.4 cm.
Crack n° 10: Dome n°4, length 1.445 m, maximum width 2.1 cm.
Crack n° 11: Dome n°4, length 1.118 m, maximum width 1.1 cm.
Crack n° 12: Dome n°3, length 0.785 m, maximum width 5.8 cm.
Crack n° 13: Dome n°3, length 2.381 m, maximum width 1.6 cm.
Crack n° 14: Dome n°3, length 1.894 m, maximum width 3.2 cm.
Crack n° 15: Dome n°3, length 0.725 m, maximum width 2.6 cm.
Crack n° 16: Dome n°2, length 1.242 m, maximum width 2.2 cm.
Crack n° 17: Dome n°2, length 1.442 m, maximum width 2.9 cm.

Cracks in the cathedral interior (Figures 220 and 221):



Figure 220.- Cracks in the cathedral interior.

- Crack n° 18: On the left under dome 1 in the southern face beside the altar piece, length 3.929 m, maximum width 9.9 cm.
Crack n° 19: In the centre under dome 1 in the southern face beside the altar piece, length 4.251 m, maximum width 7.8 cm.
Crack n° 20: On the right under dome 1 in the southern face beside the altar piece, length 5.619 m, maximum width 5.9 cm.

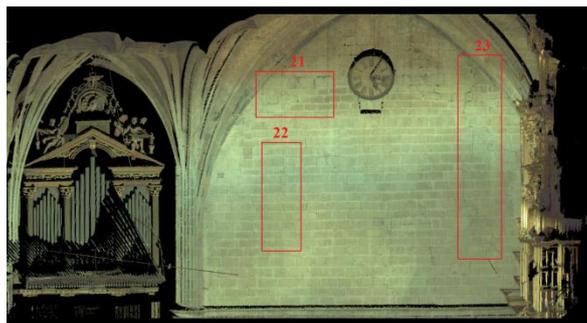


Figure 221.- Cracks in the cathedral interior.

Crack n° 21: On the left under dome 1 in the northern face beside the altar piece, length 3.347 m, 4.6 cm maximum width.

Crack n° 22: On the left under dome 1 in the northern face beside the altar piece, length 2.965 m, maximum width 2.6 cm.

Crack n° 23: On the right under dome 1 in the northern face beside the altar piece, length 6.253 m, maximum width 4.9 cm.

4.- The thermographic study reveals humidity in the four cathedral archive rooms (Figures 222, 223, 224 and 225):

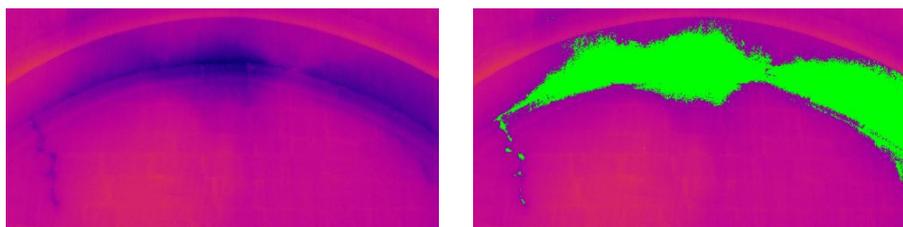


Figure 222.- Main Archive: thermography and thermography.
Main Archive: thermography and thermography treated using software.

- Surface area of the humidity in the Main Archive is 0.326 m².

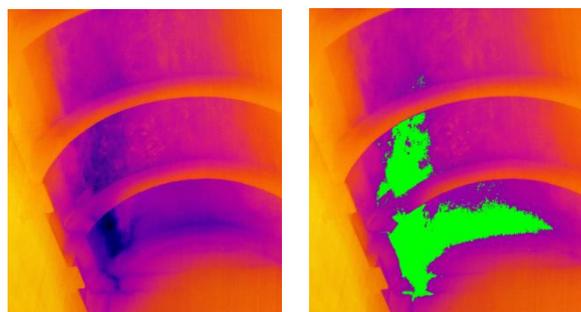


Figure 223.- Archive reception room: thermography and thermography.
Archive reception room: thermography and thermography treated using software.

- Surface area of the humidity in the archive reception room is 1.266 m².

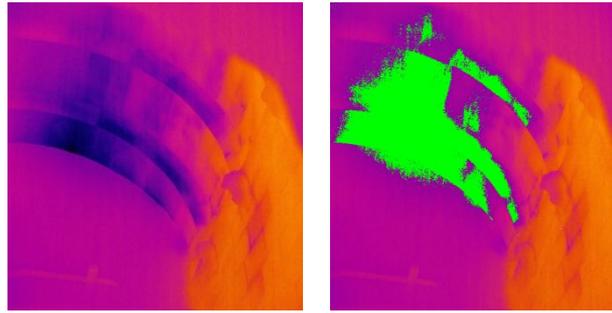


Figure 224.- Organ room: thermography and thermography.
Organ room: thermography and thermography treated using software.

- Surface area of the humidity in the organ reception room is 2.479 m².

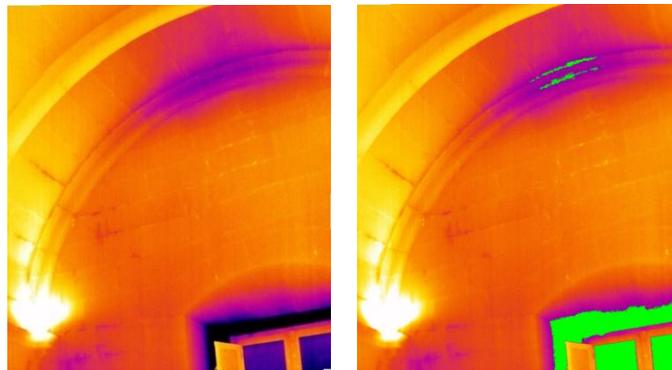


Figure 225.- Entrance hall of the Main Archive: thermography and thermography.
Entrance hall of the Main Archive: thermography and thermography treated using software.

- Surface area of the humidity in the entrance hall of the Main Archive is 0.326 m².

5.- The geometric study of the cathedral is made from the point of view of the vertical deviations and deformations of the domes from the orthoimages obtained using the laser scanning technique. These show a lack of verticality in all sections of the building:

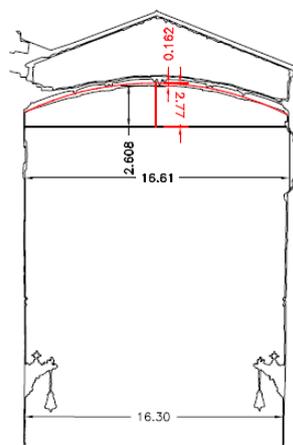


Figure 226.- Dome 1.

Conclusions

- The hollow of dome 1 has a difference with respect to its theoretical hollow of 16.2 centimetres. There is a lack of verticality of 31 centimetres in the walls (Figure 226).

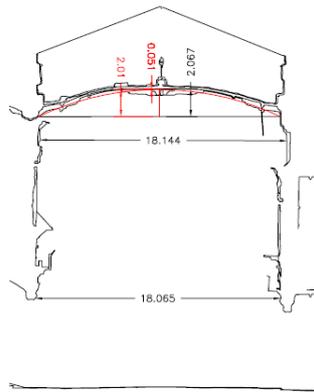


Figure 227.- Dome 2.

- The hollow of dome 2 has a difference with respect to its theoretical hollow of 5.1 centimetres. There is a lack of verticality of 8 centimetres in the walls (Figure 227).

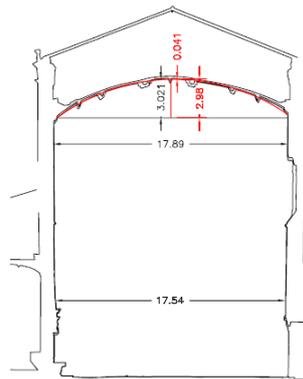


Figure 228.- Dome 3.

- The hollow of dome 3 has a difference with respect to its theoretical hollow of 4.1 centimetres. There is a lack of verticality of 35 centimetres in the walls (Figure 228).

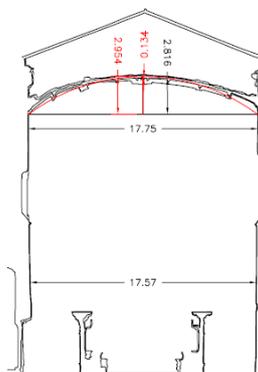


Figure 229.- Dome 4.

- The hollow of dome 4 has a difference with respect to its theoretical hollow of 13.4 centimetres. There is a lack of verticality of 18 centimetres in the walls (Figure 229).

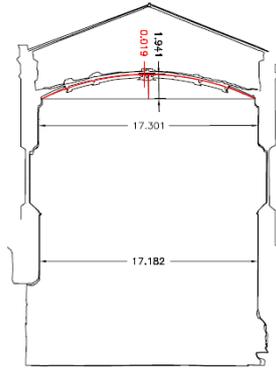


Figure 230.- Dome 5.

- The hollow of dome 5 has a difference with respect to its theoretical hollow of 2 centimetres. There is a lack of verticality of 12 centimetres in the walls (Figure 230).

6.- Observation of the real topography and the geometric study of the domes reveals that (Figure 231):

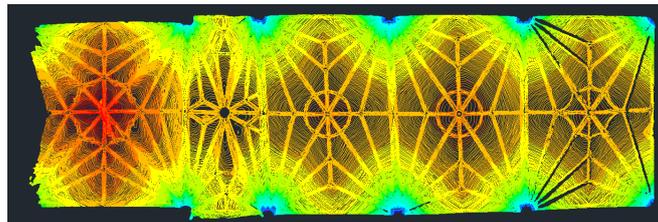


Figure 231.- Real topography of the domes.

- Domes 2 and 5, which appear to be those that best conserve their symmetry in the real topography, are also the ones found to have the least error on applying the two methods of dome construction.
- Dome 1, and above all dome 4, are those that present the most deformations and they also differ most from the theoretical model in the geometric study.

15.2.- General conclusions.-

Time leaves its mark on our heritage, in this case through multiple anomalies such as cracks and humidities.

The combination of geodesic techniques and geotechniques to test for movement in the ground on which the cathedral stands has been shown to be a valid procedure for future studies of a similar nature.

The non-destructive techniques of laser scanning and thermography are highly suitable for the documentation and preparation of a preventive plan to make possible the

diagnosis of the pathologies the building suffers and the adoption of appropriate corrective measures.

The present doctoral thesis has put into practice a working methodology which has shown laser scanning to be capable of performing topographical surveys quickly and with very good precision. This survey has generated a three-dimensional model enabling the structure of the cathedral to be modelled and the identification of structural faults such as cracks. Moreover, it has generated plans in two dimensions representing the real geometry of the cathedral making it possible to study vertical deviations and dome deformations. The study of structural calculations has been opened up for other disciplines.

This doctoral thesis has also put into practice a working methodology that has integrated the three-dimensional model generated by laser scanner with the thermographic technique. The result has been excellent, permitting the detection, location and quantification of humidities in the structure of the cathedral. Moreover, the software implemented confirms and checks the information of the humidities collected by the thermographies and also visualizes the isotherms through the displacement bar.

The combination of the laser scanning and thermography techniques have proved to be an irreplaceable tool for the structural analysis of the cathedral.

Lastly, it is important to emphasize that with the techniques and procedures developed here what has been carried out is a pathological study of the structure and foundation of the cathedral, while the diagnosis and possible solutions to the damage appearing is a matter for other disciplines.

15.3.- Future lines of work.-

The future of laser scanning and thermographic techniques applied to heritage sites is certain to be interdisciplinary given that these techniques only present the pathologies of the buildings, but never on their own do they provide diagnoses nor actions to alleviate the problems detected. These diagnoses are the competent disciplines to be performed prior to the study of pathologies, in order that actions leading to the restoration or rehabilitation of the can be implemented.

This thesis doctoral can serve as a reference for later studies of the same kind, studies pathological of the structure of historic buildings or monuments. These studies are focused on non-destructive methods that are compatible with those used in this thesis, as: documentary photography, digital image analysis, x-ray, ultrasonic pulses, portable x-ray diffraction, electron microscopy techniques,... Therefore, future lines of research can go to the combination of non-destructive techniques for documentation of monuments pathologies. As they have been used in this thesis (thermography and laser scanner), they can develop other techniques, coupled with laser scanning for three-dimensional conditions obtaining.

As technology advances, is will be perfecting the technique applied in this thesis, for example the instrumental used in this thesis shows an error on the point of 6 mm positional measurement. Currently, laser scanner is already marketed with the same benefits as employed in this thesis team, but with a positional error of 2 mm. This tells

us in the future can do is research with better quality than the current, even where instruments may incorporate features that until now do not have. For example, it could merge the choice of thermal photographs along with the laser scanner data.

16.- Bibliografía.-

- (Adel, 2011) Adel Haddad, Naif. (2011). *From ground surveying to 3D laser scanner: A review of techniques used for spatial documentation of historic sites*. Journal of King Saud University. Engineering Sciences 23, 109–118.
- (Alba et al., 2011) Alba, Mario Ivan., Barazzetti, Luigi., Scaioni, Marco., Elisabetta Rosina and Mattia Previtali. (2011). *Mapping Infrared Data on Terrestrial Laser Scanning 3D Models of Buildings*. Remote Sensing 3, 1847-1870.
- (Alcaraz et al., 2012) Antoni Alcaraz Tarragüel, Bart Krol, Cees van Westen. (2012). *Analysing the possible impact of landslides and avalanches on cultural heritage in Upper Svaneti, Georgia*. Journal of Cultural Heritage 13 (2012) 453–461.
- (Ale, 2011) Ale Véliz, Daniel. “*Métodos de Estabilización de Taludes mediante Estructuras de Suelo Reforzado*”. Universidad Nacional de Ingeniería (Argentina).
- (Alejano et al., 2011) Alejano, L., Ferrero, A., Ramírez-Oyanguren, P y Álvarez Fernández, M. (2011). *Comparison of limit-equilibrium, numerical and physical models of wall slope stability*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 48: 16–26.
- (Alonso, 2005) Alonso, Eduardo (2005). “*Estabilidad de taludes*”. Departament d’Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica E.T.S. d’Enginyeria de Camins, Canals i Ports Universitat Politècnica de Catalunya.
- (Ardaens et al., 2013) Jean-Sébastien Ardaens, Simone D’Amico, Alexander Cropp. (2013). *GPS-based relative navigation for the Proba-3 formation flying mission*. Acta Astronautica Volume 91, Pages 341–355.
- (Armesto et al., 2010) J. Armesto-González, B. Riveriro-Rodríguez, D. González-Aguilera, M.T. Rivas-Brea. *Terrestrial laser scanning intensity data applied to damage detection for historical buildings*. Journal of Archaeological Science, 37 (12) (2010), pp. 3037–3047

- (Armesto et al., 2010) J. Armesto, J. Roca-Pardiñas, H. Lorenzo, P. Arias (2010). *Modelling masonry arches shape using terrestrial laser scanning data and nonparametric methods*. Eng. Struct., 32 (2) (2010), pp. 607–615.
- (Avdelidisa y Moropouloub, 2003) Avdelidisa, N. y Moropouloub, A. (2003). *Emissivity considerations in building thermography*. Energy and Buildings 35: 663–667.
- (Avdelidis y Moropoulo, 2004) NP Avdelidis, A. Moropoulou (2004). *Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures*. J. Cult. Herit., 5 (2004), pp 119-127.
- (Ayala, 1984) Ayala Carcedo, F. J. (1984). “*Reconocimiento de campo para obras subterráneas en minería y obras civiles*”. VII Simposio Nacional “Reconocimiento de Macizos Rocosos”.
- (Ayala y Andreu, 2006) Ayala Carcedo, F. J. , y Andreu Posse, F.J. (2006) dir.-(1.ª ed. , 2.ª reimp.). “*Manual de Ingeniería de talúdes*”. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- (Balars y Argiriou, 2002) Balars, C. y Argiriou, A. (2002). *Infrared thermography for building diagnostics*. Energy and building 34: 171-183.
- (Baldi et al., 2009) Baldi, P., Casula, G., Cenni, N., Loddo, F. y Pesci, A. (2009). *GPS-based monitoring of land subsidence in the Po Plain (Northern Italy)*. Earth and Planetary Science Letters 288: 204–212.
- (Balzani, 2001) Balzani, M., et al. (2001). *A terrestrial 3D laser scanner: Accuracy tests*. in *Proceedings of the 18th Int. Symp. CIPA 2001*.
- (Beraldin, 2005) Beraldin, J. (2005). *Virtual Reconstruction of Heritage Sites: Opportunities and Challenges Created by 3D Technologies*. in *International Workshop on Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage*. Ascona, Switzerland.
- (Bishop, 1955) Bishop, A. W. (1955). “*The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes*”. Geotechnique, Vol. 5, No. 1, pp. 7-17

- (Bishop, 1960) Bishop A.W., Morgenstern N. (1960). “*Stability Coefficients for Earth Slopes*”. Geotechnique Vol 10, No. 4.
- (Bitelli et al., 2000) Bitelli, Gabriele., Bonsignore, Flavio y Unguendoli, Marco. (2000). *Levelling and GPS networks to monitor ground subsidence in the Southern Po Valley*. Journal of Geodynamics 30: 355-369.
- (Blais, 2006) Blais, F. (2006). *Terrestrial Laser Scanning*, in *International Summer School “Digital Recording and 3D Modeling*. Aghios Nikolaos, Crete, Greece.
- (Boehler y Bordas, 2003) Boehler, W., M. Bordas, and A. Marbs. (2003). *Investigating laser scanner accuracy*. in *Proc. CIPA XIXth Int. Symposium*. Antalya, Turkey.
- (Bradski y Kaeler, 2008) Bradski, Gary y Kaeler, Adrian. (2008). *Aprender OpenCV. Visión por Computador de la biblioteca OpenCV*. O'Reilly Media.
- (Brenner, 2006) Brenner, C. (2006). *Aerial laser scanning*. in *International Summer School “Digital Recording and 3D Modeling”*. Aghios Nikolaos, Crete, Greece.
- (Brooks et al., 2012) Brooks, S., Spencer, T. y Boreham, S. (2012). *Deriving mechanisms and thresholds for cliff retreat in soft-rock cliffs under changing climates: Rapidly retreating cliffs of the Suffolk coast, UK*. *Geomorphology* 153–154, 48–60.
- (Can et al., 2012) Eray Can, Şenol Kuşcu, Cetin Mekik. (2012). *Determination of underground mining induced displacements using GPS observations in Zonguldak-Kozlu Hard Coal Basin*. *Coal Geology* 89 (2012) 62–69.
- (Canuti et al., 2009) P. Canuti, C. Margottini, R. Fanti, E.N. Bromhead (2009). *Cultural Heritage and Landslides: Research for Risk Prevention and Conservation*. K. Sassa, P. Canuti (Eds.), *Landslides–Disaster Risk Reduction*, Springer Heidelberg, Berlin (2009), pp. 401–433.
- (Carrillo y Aramburo, 2013) José Gerardo Carrillo González, J. Arámburo-Lizárraga. (2013). *Digitalized Roads based on GPS Data in a Virtual World*. *Procedia Technology* Volume 7, 2013, Pages 20–29.

- (Clark y Robson, 2004) Clark, J. and S. Robson. (2004). *Accuracy of measurements made with a Cyrax 2500 laser scanner against surfaces of known colour*. in *Proc. of XXth ISPR 2004*. Istanbul, Turkey.
- (Chávez, 2011) Chávez Peralta, Javier. (2011). “*Estabilidad de taludes y cimentaciones profundas. Mecánica de suelos II*” Universidad Privada a las Peruanas.
- (Chueca et al., 1996) Chueca Pazos, Manuel., Herráez Boquera, José y Berné Valero, José Luis. (1996). *Métodos Topográficos*. Paraninfo.
- (COIT, 2013) COIT “*Galileo: el sistema europeo de navegación por satélite*”. Consultado el 13 de mayo de 2013, de <http://www.coit.es/publicac/publbit/bit127/especial3.htm>.
- (Colorado, 2013) Colorado University (2013). *US global Positioning System. GPS*. http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html
- (Coșarcă et al., 2009) Coșarcă, Constantin., Jocea, Andreea., Savu, Adrian. (2009). “*Analysis of error sources in Terrestrial Laser Scanning*”. *RevCAD – Journal of Geodesy and Cadastre*.
- (Cuenca, 2001) Cuenca Payá, Artemio (2001). “*Comentarios para el cálculo de taludes*”. Laboratorio de Carreteras de Alicante.
- (De Grado, 1998) De Grado Contreras, José Ignacio. *Termografía infrarroja. Una valiosa herramienta*. Revista Energía. Mayo/junio 1998. www.energuia.com
- (De Luca et al., 2011) Livio De Luca, Chawee Busayarat, Chiara Stefani, Philippe Véron, Michel Florenzano. (2011). *A semantic-based platform for the digital analysis of architectural heritage*. *Computers & Graphics* 35 (2011) 227–241.
- (De Luis, 2009) De Luis Ruiz, Julio Manuel. (2009). Tesis Doctoral: “*Contraste en la ejecución de auscultaciones geodésicas por métodos clásicos y con láser escáner*”. Universidad de Cantabria.
- (De Matteis et al., 2003) De Matteis, Álvaro F., Ing. Silvia Angelone, Ing. María Teresa Garibay (2003). “*Estabilidad de taludes*”. *Geología y Geotecnia*. Universidad Nacional de Rosario. Facultad de CS. Exactas, Ingeniería y Agrimensura.

- (De Reu et al., 2013) Jeroen De Reu, Gertjan Plets, Geert Verhoeven, Philippe De Smedt, Murciélagos Machteld, Bart Cherretté, Wouter De Maeyer, Jasper Deconynck, Davy Herremans, Pieter Laloo, Marc Van Meirvenne, Wim De Clercq (2013). *Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage*. Journal of Archaeological Science Volume 40, Issue 2, February 2013, Pages 1108–1121.
- (Dabbour, 2012) Loai M. Dabbour, Loai M. (2012). *Geometric proportions: The underlying structure of design process for Islamic geometric patterns*. Frontiers of Architectural Research 1, 380–391.
- (Echeverría et al., 2013) Anna Echeverria, Giorgi Khazaradzea, Eva Asensioa, Jorge Gárateb, José Martín Dávilab, Emma Suriñacha. (2013). *Crustal deformation in eastern Betics from CuaTeNeo GPS network*. Tectonophysics Volume 608, Pages 600–612.
- (Elseberg et al., 2013) Jan Elseberg, Dorit Borrmann, Andreas Nüchter. (2013). *One billion points in the cloud – an octree for efficient processing of 3D laser scans*. Photogrammetry and Remote Sensing (2013) 76-88.
- (Eray y Cetin, 2012) Eray Can Şenol Kuşcu y Cetin Mekik. (2012). *Determination of underground mining induced displacements using GPS observations in Zonguldak-Kozlu Hard Coal Basin*. International Journal of Coal Geology 89: 62–69.
- (Erasmus, 2013) Erasmus. Obtenido el 11 de marzo de 2013. <http://www.erasmus.com.co/pdf/camaras/Breve%20Historia%20de%20la%20Termografia.pdf>
- (ESA, 2009) ESA. 2009. *User guide for EGNOS. Application developers*. European Space Agency.
- (Faro, 2010) Faro. (2010). “*Tecnología de escaneado láser 3D: nuevas posibilidades para ingeniería civil, arquitectura y patrimonio*”.
- (Fellenius, 1922) Fellenius W. (1922). “*Statens Jarnjvagens Geotekniska Commission, Stockholm, Sweden*”.
- (Fine, 2013) Fine civil engineering software. Obtenido el 12 de febrero, 2012. <http://www.finesoftware.es/software-geotecnico/ayuda/asientos/morgenstern-price-01/>

- (Flir, 2011) FLIR Systems AB. Guía de termografía para mantenimiento predictivo. 2011.
- (Fluke y Snell, 2009) Fluke Corporation. The Snell Group. Introducción a los principios de la termografía. 2009.
- (Fukuoka et al., 2005) H. Fukuoka, K. Sassa, G. Wang, F. Wang, Y. Wang, Y. Tian (2005). *Landslide Risk Assessment and Disaster Management in the Imperial Resort Palace of Lishan, Xian, China (C101-4)*. Wang (Eds.), *Landslides*, Springer Heidelberg, Berlin (2005), pp. 81–89.
- (Garay y Mayorga, 2003) Garay Obregón, F. y Mayorga Zelaya, G. (2003). “*Estudio de estabilidad de taludes con fines normativos de tres carreteras principales*”. Tesina sometida a la consideración de la Comisión Académica de Programa de Estudios de Maestría para optar al grado de Master en Ingeniería del Transporte. Universidad Nacional de Ingeniería. Sistema de Estudio de Postgrado. Managua, Nicaragua.
- (García, 1999) García Mogollón, Florencio-Javier. (1999). “*La Catedral de Coria. Arcón de Historia y Fe*”. Edilesa. León.
- (García, 2008) García Álvarez, David Abelardo. *Sistema GNSS*. Proyecto Final de Carrera. Universidad Autónoma de Madrid. Escuela Politécnica Superior. 2008.
- (García-Gómez et al., 2011) García-Gómez, Isabel., Fernández de Gorostiza López de Viñaspre, Mirien., Mesanza Moraza, Amaia. (2011). “*Láser escáner y nubes de puntos. Un horizonte aplicado al análisis arqueológico de edificios*”. *Arqueología de la arquitectura*, 8, enero-diciembre 2011, págs. 25-44.
- (García-Asenjo y Garrigues, 2008) García-Asenjo Villamayor, Luis y Garrigues Talens, Pascual. (2008). *Procesamiento de datos GPS*. Universidad Politécnica de Valencia.
- (García y Lerma, 2013) García-San-Miguel, D. y Lerma, J.L. (2013). *Geometric calibration of a terrestrial laser scanner with local additional parameters: An automatic strategy*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 79: 122–136.

- (Gianni et al., 2013) Gianni Bartoli, Michele Betti, Saverio Giordano. (2013). *In situ static and dynamic investigations on the ‘Torre Grossa’ masonry tower*. Engineering Structures 52: 718–733.
- (Gizzi, 2008) F.T. Gizzi (2008) *Identifying geological and geotechnical influences that threaten historical sites: a method to evaluate the usefulness of data already available*. J. Cult. Herit., 9 (2008), pp. 302–310.
- (Glonass, 2005) *GLONASS: Status and Perspectives*”. Federal Space Agency of the Russian Federation, 2005. Obtenida el 14 de mayo, 2013. <http://www.munich-satellite-navigation-summit.org/Summit2005/Beitraege/3Ses1-Revnivvykh.pdf>
- (Glonass, 2008) GLONASS INTERFACE CONTROL DOCUMENT. Navigational radiosignal In bands L1, L2 (Edition 5.1) MOSCOW 2008. Obtenido el 22 de mayo de 2013, [https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDEQFjAA&url=http%3A%2F%2Ffacility.unavco.org%2Fdata%2Fdocs%2FICD_GLONASS_5.1_\(2008\)_enpdf&ei=IoXFUayhE5Tb7AaN4ICAg&usq=AFQjCNHy1cWmofPY54r1jkcOoNdrExnWQ&sig2=LE5CFNHKVIQBT9deJA_liQ&bvm=bv.48293060,d.ZGU](https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDEQFjAA&url=http%3A%2F%2Ffacility.unavco.org%2Fdata%2Fdocs%2FICD_GLONASS_5.1_(2008)_enpdf&ei=IoXFUayhE5Tb7AaN4ICAg&usq=AFQjCNHy1cWmofPY54r1jkcOoNdrExnWQ&sig2=LE5CFNHKVIQBT9deJA_liQ&bvm=bv.48293060,d.ZGU)
- (Glonass, 2013) Glonass. Obtenido el 15 de mayo 2013 <http://www.glonass-ianc.rsa.ru/>
- (González, 2002) Luis González Vallejo. (2002). *Ingeniería Geológica*. Pearson Education. España.
- (Grinzato et al., 2002) E. Grinzato, P.G. Bison, S. Marinetti (2002). *Monitoring of ancient buildings by the thermal method*J. Cult. Herit., 3 (2002), pp. 21–29.
- (Herráez et al., 2013) José Herráez, Pablo Navarro, José Luis Denia, María Teresa Martín, Jaime Rodríguez (2013). *Modeling the thickness of vaults in the church of Santa Maria de Magdalena (Valencia, Spain) with laser scanning techniques*. Journal of Cultural Heritage <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2013.11.015>.

- (Herrero, 2013) Herrero, Manuel. (2013). *Análisis de la bóveda del Campo de la Virgen de la Catedral de Coria*. Universidad de Cáceres.
- (Hoek y Bray, 1977) Hoek, E. , Bray, J.W. and Boyd, J.M. (1977). “*Rock Slope Engineering*”. Revised second edition. Institution of Mining and Metallurgy. British Library Cataloguing in Publication Data.
- (Holanda y Bermejo, 1998) Holanda Blas, M^a Paz; Bermejo Ortega, Juan Carlos. *GPS & GLONASS*. Madrid. (1998). Obenido el 14 de mayo de 2013, <http://mayerwin.free.fr/>
- (Hong et al., 2013) Sungchul Hong, Joon Heo, Alan P. Vonderohe. (2013). *Simulation-based approach for uncertainty assessment: Integrating GPS and GIS*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies Volume 36, 2013, Pages 125–137.
- (Huerta, 2004) Huerta, Santiago. (2004). “*Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*”. Instituto Juan de Herrera. Madrid. Páginas 225-237.
- (Hughes, 1986) Hughes, A.J. (1986). *Laser Beam Scanning: Opto-mechanical Devices, Systems and Data Storage Optics*. Journal of Modern Optics, 33(8): p. 950-951.
- (Ifatca, 1999) IFATCA. (1999) A beginner’s to GNSS in Europe. www.ifatca.org/system/files/gnss.pdf.
- (Imposa, 2010) S. Imposa (2010). “*Infrared thermography and Georadar techniques applied to the “Sala delle Nicchie” (Niches Hall) of Palazzo Pitti, Florence (Italy)*” J. Cult. Herit., 11 (2010), pp. 259–264
- (Ingesand y Schulz, 2003) Ingesand, H., A. Ryf, and T. Schulz. (2003). *Performances and experiences in terrestrial scanning*. in *Proc. Optical 3D Measurement Techniques*. Zurich, Switzerland.
- (Iriarte et al., 2010) E. Iriarte, M.Á. Sánchez, A. Foyo, C. Tomillo (2010). “*Geological risk assessment for cultural heritage conservation in karstic caves*” J. Cult. Herit., 11 (2010), pp. 250–258.
- (ITC, 2011) Infrared Training Center. “*Manual curso, nivel 1*”

- (ITIR, 2013) *Blog del Instituto de Termografía Infrarroja*. Obtenido el 11 de marzo de 2013. <http://comunitir.blogspot.com.es/>
- (Janbu, 1973) Janbu, N. (1973), "*Soil Stability Computations*", In *Emhankment - Dam Engineering*. Casagrande Volume, Hirshfeld, R. C. & Poulos, S. J., eds., New York: John Wiley & Sons, pp. 47-86
- (Jiao et al., 2013) Jiao, Yu-Yong., Wang, Zi-Hao., Wang, Xin-Zhi., Amoussou Coffi Adoko y Zhen-Xing Yang. (2013). *Stability assessment of an ancient landslide crossed by two coal mine tunnels*. *Engineering Geology* 159: 36–44.
- (Juárez y Rico, 2004) Juárez Badillo, Eulalio. Rico Rodríguez, Alfonso. "*Mecánica de suelos tomo II*". Limusa.
- (Jurado, 2013) Jurado Jiménez, Francisco (2013). *Proyecto de consolidación estructural y restauración de la Catedral de Coria*. Oficina de arquitectura Francisco Jurado.
- (Klaus-G et al., 2013) Klaus-G. Hinzen, Stephan Schreiber, Sebastian Rosellen. (2013). *A high resolution laser scanning model of the Roman theater in Pinara, Turkey – comparison to previous measurements and search for the causes of damage*. *Journal of Cultural Heritage Pages* (2013) 424-430.
- (Koutsoudis et al., 2013) Anestis Koutsoudis, Blaž Vidmar, George Ioannakis, Fotis Arnaoutoglou, George Pavlidis, Christodoulos Chamzas. *Multi-image 3D reconstruction data evaluation*. *Journal of Cultural Heritage*.
- (Lagüela et al., 2011) Lagüela S., Martínez J., Armesto J. & Arias P., (2011). *Energy efficiency studies through 3D laser scanning and thermographic technologies*. *Energy and buildings*, 43: 1216-1221.
- (Lagüela et al., 2011) Lagüela S; González-Jorge, H; Armesto, J; Arias, P. (2011). *Calibration and verification of thermographic cameras for geometric measurements*. *Infrared Physics & Technology* 54: 92–99.

- (Lagüela et al., 2012) S. Lagüela, J. Armesto, P. Arias, J. Herráez. (2012). *Automation of thermographic 3D modelling through image fusion and image matching techniques*. *Automation in Construction* Volume 27, Pages 24–31.
- (Lagüela et al., 2013) Lagüela, S., Díaz-Vilariño, L., Martínez, J. y Armesto, J. (2013). *Automatic thermographic and RGB texture of as-built BIM for energy rehabilitation purposes*. *Automation in Construction* 31. 230–240.
- (Lanza, 2003). S.G. Lanza (2003). *Flood hazard threat on cultural heritage in the town of Genoa Italy* *J. Cult. Herit.*, 4 (2003), pp. 159–167.
- (Lerma et al., 2011) Lerma, José Luis., Cabrelles, Miriam y Portalés, Cristina. (2011). *Multitemporal thermal analysis to detect moisture on a building façade*. *Construction and Building Materials* 25: 2190–2197.
- (Lerma y Biosca, 2008) Lerma García, José Luis y Biosca Tarongers, Josep.(2008). Traducción. *Teoría y práctica del Escaneado Láser Terrestre*. Versión 5.
- (Lichti, 2000) Lichti, D. (2000). *Calibration and testing of a terrestrial laser scanner*. in *Int. Arch. Of Photogrammetry and Remote Sensing*.
- (Lichti y Gordon, 2004) Lichti, D. and S.J. Gordon. (2004). *Error Propagation in Directly Georeferenced Terrestrial Laser Scanner Point Clouds for Cultural Heritage Recording*. in *Proc. of FIG Working Week*. Athens, Greece.
- (Lollino y Audisio, 2006) G. Lollino, C. Audisio (2006). *UNESCO World Heritage sites in Italy affected by geological problems, specifically landslide and flood hazard*. *Landslides*, 3 (2006), pp. 311–321.
- (Maierhofer et al., 2010) C. Maierhofer, M. Rollig, R. Krankenhagen (2010). *Integration of active thermography into the assessment of cultural heritage buildings*. *J. Mod. Opt.*, 57 (2010), pp. 1790–1802.

- (Mancera et al., 2010) Mancera-Taboada, Juan., Rodríguez-González, Pablo., González-Aguilera, Diego., Muñoz-Nieto, Ángel., Gómez-Lahoz, Javier., Herrero-Pascual, Jesús y Inmaculada Picón-Cabrera. (2010). *On the use of laser scanner and photogrammetry for the global Digitization of the medieval walls of Avila*. IAPRS, Vol. XXXVIII, Part 3A.
- (Manual OpenCV, 2013) *Manual de referencia OpenCV Suelto 2.4*. Obtenido 27 de marzo de 2012. [Http://docs.opencv.org/](http://docs.opencv.org/)
- (Marcato et al., 2011) Marcato, G., Mantovani, M., Pasuto, A., Zabuski, L. y Borgatti, L. (2011). *Monitoring, numerical modelling and hazard mitigation of the Moscardo landslide (Eastern Italian Alps)*. Engineering Geology 128: 95–107.
- (Melgosa, 2011) Melgosa Revillas, Sergio. (2011). *Guía de la termografía infrarroja*. Madrid.
- (Ministerio, 2013) Ministerio de Transportes y Comunicaciones Provias Nacional, Perú. “*estudio complementario de estabilidad de taludes y adecuación del expediente técnico de la carretera Tingo Maria – aguaytía, tramo 1.2: km. 15+200 – km. 51+551*”
- (Moreno et al., 2013) Moreno Roca, Sergio., Rodriguez, José Luis., Gayete Fos, Raquel y Martínez Jiménez, David. “*GPS: Global Positioning System*”. Universidad Politécnica de Valencia. Obtenido el 14 de mayo de 2013, www.upv.es/satelite/
- (Morgenstern y Price, 1965) Morgenstern, N.R. & Price, V.E. (1965). “*The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces*”. Geotechnique, Vol. 15, No 1.
- (Morgenstern y Price, 1967) Morgenstern, N.R. & Price, V.E. (1967). “*A numerical method for solving the equations of stability of general slip surfaces*”. Computer Journal, 9: 388-393.
- (Moropoulou et al., 2013) Antonia Moropoulou, Kyriakos C. Labropoulos, Ekaterini T. Delegou, Maria Karoglou, Asterios Bakolas, (2013). *Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage*. Construction and Building Materials, Volume 48, November 2013, Pages 1222–1239.

- (Muelas, 2010) Muelas Rodríguez, Ángel (2010). “*Manual de mecánica del suelo y cimentaciones*”. Uned.
- (NCSE, 2002) Ministerio de Fomento. (2002). “*Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-02 Parte General y Edificación*”. BOE núm. 244.
- (Núñez y Buill, 2009) M^a Amparo Núñez Andrés, Felipe Buill Pozuelo, (2009). *Evolution of the architectural and heritage representation*. Landscape and Urban Planning 91 (2009) 105–112.
- (Núñez et al., 2012) Amparo Núñez Andrés, Felipe Buill Pozuelo, Joaquín Regot Marimón, Andrés de Mesa Gisbert (2012) *Generation of virtual models of cultural heritage*. Journal of Cultural Heritage, Volume 13, Issue 1, 2012, Pages 103–106.
- (Otsu, 1979) Nobuyuki Otsu (1979). “*Un método de selección de umbral a partir del histograma de niveles de gris*”. IEEE Trans. Sys., Hombre., Cibernético. 9 (1): 62-66).
- (Obando, 2009) Tupak Ernesto Obando Rivera (2009). “*Sistemas de Monitoreo y control de la Estabilidad de taludes Rocosos y Suelos*.” Master y Doctorado en Geología, y Gestión Ambiental de los Recursos Mineros en la Universidad Internacional de Andalucía UNÍA (Huelva, España).
- (Paoletti et al., 2013) Domenica Paoletti, Darío Ambrosini, Stefano Sfarra, Fabio Bisegna, (2013). *Preventive thermographic diagnosis of historical buildings for consolidation*. Revista de Patrimonio Cultural, Volumen 14, Número 2, marzo-abril de 2013, Pages 116-121.
- (Paschotta, 2013) Paschotta, R. *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*. Obtenido el 17 de octubre de 2012, <http://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>.
- (Peñafiel y Zayas, 2001) Peñafiel, Javier; Zayas, Jorge. 2001. *Fundamentos del Sistema GPS y aplicaciones en la topografía*. Colegio Oficial de Ingenieros de Topografía. Delegación Territorial de Madrid-Castilla La Mancha.

- (Pesci y Giuseppe, 2011) Pesci, Arianna y Giuseppe Casula, Enzo. (2011). *Laser scanning the Garisenda and Asinelli towers in Bologna (Italy): Detailed deformation patterns of two ancient leaning buildings*. Journal of Cultural Heritage 12: 117–127.
- (Pesci et al., 2012) Pesci, Arianna., Bonali, Elena., Galli, Claudio y Enzo Boschi. (2012). *Laser scanning and digital imaging for the investigation of an ancient building: Palazzo d'Accursio study case (Bologna, Italy)*. Journal of Cultural Heritage 13: 215–220.
- (Pesci, 2013) Arianna Pesci, Giordano Teza, Elena Bonali, Giuseppe Casula, Enzo Boschi. (2013). *A laser scanning-based method for fast estimation of seismic-induced building deformations*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Volume 79, May 2013, Pages 185–198
- (Reshetyuk, 2006) Reshetyuk, Yuriy . (2006). “*Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners*”. Royal Institute of Technology (KTH) Department of Transport and Economics.
- (Riveiro et al., 2013) B. Riveiroa, H. González-Jorgeb, M. Varela, D.V. Jauregui. (2013). *Validation of terrestrial laser scanning and photogrammetry techniques for the measurement of vertical underclearance and beam geometry in structural inspection of bridges*. Measurement Vol. 46, 784-794.
- (Román y Diez, 1999) Román Ortiz, Rogelio; Diez Fernández, David. 1999. *EGNOS, WAAS and MSAS*. ATC magazine. Invierno 98-99.
- (Rodríguez-González et al., 2012) Pablo Rodríguez-González, Jesús Sabas Herrero Pascual, Diego González-Aguilera, Ángel Luis Muñoz-Nieto, Juan Mancera-Taboada, Nilda Sánchez-Martin, David Hernández-López, Beatriz Felipe-García, Miguel Ángel Moreno Hidalgo. (2012). “*Aplicación de técnicas geomáticas al análisis y diagnóstico de patologías en el patrimonio arquitectónico.*” X Topcart 2012.

- (Russo et al., 2010) Russo, G., Bergamo, O., Damiani, L y Lugato, D. (2010). *Experimental analysis of the "Saint Andrea" Masonry Bell Tower in Venice. A new method for the determination of "Tower Global Young's Modulus E "*. Engineering Structures 32: 353-360.
- (Sánchez et al., 2007) M.A. Sánchez, A. Foyo, C. Tomillo, E. Iriarte (2007). *Geological risk assessment of the area surrounding Altamira cave: a proposed natural risk index and safety factor for protection of prehistoric caves*. Eng. Geol., 94 (2007), pp. 180–200.
- (Sánchez et al., 2013) Sánchez, Alberto; Pérez, Alejandro; Jigena, Bismarck; Fernández, Juan A.; Páez, Raúl. 2013. *Sistemas GNSS*. Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía. Universidad de Cádiz.
- (Shapira, 1986) N.H. Shapira (1986)*Earthquakes and art preservation: a view from the San Andreas fault*. Sci. Total Environ., 56 (1986), pp. 401–410.
- (Shestakov et al., 2012) Nikolay V. Shestakov, Hiroaki Takahashi, Mako Ohzono , Alexander S. Prytkov, Victor G. Bykov, Mikhail D. Gerasimenko, Margarita N. Luneva, Grigory N. Gerasimov, Andrey G. Kolomiets, Vladimir A. Bormotov, Nikolay F. Vasilenko, Jeongho Baek, Pil-Ho Park, Mikhail A. Serov. *Analysis of the far-field crustal displacements caused by the 2011 Great Tohoku earthquake inferred from continuous GPS observations*. Tectonophysics 524–525 (2012) 76–86.
- (Staiger, 2005) Staiger, R., (2005). "The Geometrical Quality of Laser Scanner (TLS)." In Proceedings of FIG Working Week 2005 and GSDI-8. Cairo, Egypt, April 16 – 21.
- (Suárez, 2001) Suarez Díaz, Jaime (2001). "Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales". U. Industrial de Santander.
- (Tapete et al., 2013) Deodato Tapete, Nicola Casagli, Guido Luzi, Riccardo Fanti, Giovanni Gigli, Davide Leva. (2013). *Integrating radar and laser-based remote sensing techniques for monitoring structural deformation of archaeological monuments*. Archaeological Science Volume 40, Issue 1, Pages 176–189.

- (Testo, 2008) Testo AG. (2008). *Termografía, guía de bolsillo*.
- (Teza y Pesci, 2013) Giordano Teza, Arianna Pesci, (2013). *Geometric characterization of a cylinder-shaped structure from laser scanner data: Development of an analysis tool and its use on a leaning bell tower*. Journal of Cultural Heritage Volume 14, Issue 5, September–October 2013, Pages 411–423.
- (Varnes, 1978) Varnes, D.J. (1978) “*Slope movement types and processes*”. En : Shuster, R.L. y Krizek, R.J. (Eds). *Landslides: Analisis and control*. Special Report 176. Transportation Reserch Borrard. Nacional Reserch Council, Washintong D.C. 11-33.
- (Vlcko, 1999) Vlcko, J. (1999). *Engineering geological failures on historic structures and historic sites*. Acta Geologica UniversitatisComeniane, Nr. 54.
- (Vlcko, 2004) Vlcko, J. (2004). *Extremely slow slope movements influencing the stability of Spis Castle, UNESCO site*. Landslides,1(1), Springer Verlag.
- (Weichel, 1990) Weichel, H. (1990). *Laser Beam Propagation in the Atmosphere*. Bellingham, WA: SPIE Optical Engineering Press.
- (Wu et al., 2013) Sheng Lin Wu, Hong Liang Deng, Kai Jiang Chen, Ming Yan Zhu, Dong Hui Huang, Si Yuan Fu. (2013). *Visual Monitoring Technology of the Tunnel 3D Laser Scanning and Engineering Applications*. Advanced Materials Research (Volumes 779 - 780), 463-468.
- (Xiong et al., 2013) Xuehan Xiong, Antonio Adan, Burcu Akinci, Daniel Huber. (2013). *Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data*. Automation in Construction 31 (2013) 325–337.
- (Xiyuang et al., 2013) Xiyuan Chen, Chong Shen, Wei-Bin Zhang, Masayoshi Tomizuka, Yuan Xu, Kuanlin Chiu. (2013). *Novel hybrid of strong tracking Kalman filter and wavelet neural network for GPS/INS during GPS outages*. Measurement Volume 46, Issue 10, Pages 3847–3854

(Xuehan et al., 2013)

Xuehan Xiong, Antonio Adan, Antonio., Burcu Akinci., Huber, Daniel. (2013). *Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data*. *Automation in Construction* 31: 325–337.