

MASTER EN GESTIÓN Y VALORACIÓN URBANA (UPC)

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE RUTAS ÓPTIMAS EN ENTORNOS URBANOS A PARTIR DE DATOS DE LTS

DIRECTORA: PILAR GARCIA ALMIRALL, DOCTORA ARQUITECTA
ALUMNO: FRANCESC VALLS DALMAU, ARQUITECTO
JULIO 2010

Índice

Índice	2
Índice de figuras	5
Índice de tablas.....	7
Índice de ecuaciones	7
1 Introducción	8
1.1 Evaluación de la accesibilidad en entornos urbanos	8
1.1.1 Aproximación metodológica para la obtención datos del LTS	9
1.1.2 Aproximación metodológica para el análisis de redes	10
1.2 Metodología seguida en los trabajos realizados	11
1.2.1 Metodología para la obtención de la topografía	11
1.2.2 Metodología para la detección de obstáculos	13
1.2.3 Metodología para la evaluación de red	13
2 Estado del arte	16
2.1 Accesibilidad y análisis de redes.....	16
2.2 Topografía	16
2.3 Marco legislativo.....	19
3 Incorporación de la información de partida al SIG	21
3.1 Importación de la información de la nube de puntos.....	21
3.2 Cartografía del Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC).....	23
3.3 Cartografía del Ayuntamiento de Tossa de Mar.....	25
3.4 Otras fuentes de datos disponibles públicamente.....	26
4 Tratamiento de los datos del LTS.....	27
4.1 Conversión a entidades de tipo punto.....	27
4.2 Conversión a entidad de tipo raster	29
4.2.1 Interpolación IDW (Inverse Distance Weighted)	33
4.2.2 Interpolación Spline.....	34

4.2.3	Interpolación Natural Neighbor	35
4.2.4	Interpolación Topo to Raster	36
4.2.5	Interpolación Trend	37
4.2.6	Interpolación Kriging	38
4.3	Conversión a entidad tipo TIN	40
5	Obtención de la topografía	44
5.1	Viabilidad de la utilización de la información del ICC	44
5.2	Obtención de muestras representativas.....	46
5.2.1	Clasificación según la desviación estándar	47
5.2.2	Clasificación según el rango	48
5.2.3	Clasificación según la pendiente.....	50
5.2.4	Clasificación según la curvatura	51
5.2.5	Metodologías adicionales para la identificación de candidatos	53
5.3	Generación de una topografía representativa.....	60
5.3.1	Generación de un Modelo Digital de Terreno	62
5.3.2	Generación de un TIN.....	64
6	Identificación de los obstáculos.....	66
6.1	Identificación de fachadas.....	66
6.2	Identificación de escaleras	68
6.3	Identificación de pasos con anchura insuficiente	70
6.4	Identificación de pasos con altura insuficiente	72
6.5	Identificación de zonas con iluminación inadecuada	74
7	Preparación de la geometría para el análisis de redes	78
7.1	Obtención de los ejes de calles.....	78
7.2	División de los tramos en subtramos	79
7.3	Obtención de las rutas en 3D.....	80
7.4	Incorporación de la información de la pendiente de cada subtramo.....	82
7.5	Incorporación de la información de los obstáculos	84

8	Definición de las redes para el análisis	87
8.1	Definición de la red para usuarios estándar	88
8.2	Definición de la red para usuarios con movilidad reducida	90
8.3	Definición de la red para usuarios en silla de ruedas.....	94
9	Obtención de los itinerarios accesibles	99
9.1	Definición de los puntos de interés	99
9.2	Obtención de rutas para usuarios estándar	101
9.2.1	Ruta entre múltiples puntos para usuarios estándar.....	102
9.2.2	Matriz origen-destino para usuarios estándar	103
9.2.3	Rutas posibles para usuarios estándar	108
9.3	Obtención de rutas para usuarios con movilidad reducida	112
9.3.1	Ruta entre múltiples puntos para usuarios con movilidad reducida	113
9.3.2	Matriz origen-destino para usuarios con movilidad reducida	114
9.3.3	Rutas posibles para usuarios con movilidad reducida	118
9.4	Obtención de rutas para usuarios en silla de ruedas	122
9.4.1	Ruta entre múltiples puntos para usuarios en silla de ruedas	123
9.4.2	Matriz origen-destino para usuarios en silla de ruedas.....	124
9.4.3	Rutas posibles para usuarios en silla de ruedas.....	128
10	Conclusiones	132
11	Bibliografía	134
12	Anexos	139
12.1	Código VisualBasic del módulo de identificación de candidatos.....	139
12.2	Código VisualBasic del módulo de cálculo de pendientes	141
12.3	Código VisualBasic del módulo de cálculo de obstáculos	144

Índice de figuras

Figura 1: Detección de ruinas Maya bajo la cobertura vegetal (fuente: NY Times)	17
Figura 2: Archivo ASCII procedente del LTS	22
Figura 3: Información vectorial y raster del ICC importada, filtrada y recortada	24
Figura 4: Ubicación del alumbrado proporcionada por el Ayuntamiento de Tossa de Mar	25
Figura 5: Información de planeamiento importada y georeferenciada	26
Figura 6: Nube de puntos importada en ArcGIS a partir del archivo ASCII (2D y 3D)	27
Figura 7: Raster de elevaciones en falso color	30
Figura 8: Numero de puntos muestreados por píxel (rojo = 1 ; negro = sin datos)	31
Figura 9: Interpolación IDW con los valores considerados óptimos y evaluación del error.....	33
Figura 10: Interpolación Spline con los valores considerados óptimos y evaluación del error.....	34
Figura 11: Esquema de asignación de valores del algoritmo Natural Neighbors (fuente: ESRI)	35
Figura 12: Interpolación Natural Neighbor y evaluación del error	35
Figura 13: Interpolación Topo to Raster y evaluación del error	36
Figura 14: Interpolación Trend de exponente 9 en IDRISI y evaluación del error.....	37
Figura 15: Kriging y evaluación del error	38
Figura 16: Representación de la varianza de la interpolación Kriging	39
Figura 17: TIN generado a partir de la nube de puntos del LTS	40
Figura 18: TIN modelando como vacíos las zonas correspondientes a las manzanas.....	41
Figura 19: Triángulos del TIN clasificados según su altura (con sombreado).....	42
Figura 20: Triángulos del TIN clasificados según la dirección de su normal.....	42
Figura 21: Triángulos del TIN clasificados según su pendiente máxima	43
Figura 22: TIN obtenido a partir de la información altimétrica del ICC.....	44
Figura 23: Interpolación Kriging y Varianza de los puntos del ICC del ámbito.....	45
Figura 24: Varianza representada sobre el MDT generado a partir de los puntos del ICC.....	45
Figura 25: Diagrama de bloques del módulo de identificación de candidatos	46
Figura 26: Clasificación de candidatos según la desviación estándar	47
Figura 27: Clasificación de candidatos según el rango.....	48
Figura 28: Clasificación de candidatos según la pendiente	50
Figura 29: Clasificación de candidatos según la curvatura (perfil)	51
Figura 30: Curvatura de una superficie en planta y en perfil.....	52
Figura 31: Densidad de lecturas por unidad de área	54
Figura 32: Valores mínimos para cada píxel del conjunto de la nube de puntos	55
Figura 33: Valores máximos para cada píxel del conjunto de la nube de puntos	56
Figura 34: Plano de pendientes de los valores máximos del conjunto de la nube de puntos	57
Figura 35: Dimensión fractal representando la rugosidad del terreno.....	58
Figura 36: Rango (izquierda) y desviación estándar (derecha) del conjunto de la nube de puntos.....	59
Figura 37: Puntos evaluados para generar la topografía	60
Figura 38: Modelo Digital de Terreno (interpolación Natural Neighbors) a partir de los puntos LTS	62
Figura 39: Modelo Digital de Terreno corregido a partir de los puntos seleccionados.....	63
Figura 40: TIN generado a partir de los puntos seleccionados	64

Figura 41: Detección de fachadas mediante la pendiente	67
Figura 42: Escaleras digitalizadas a partir de la información del LTS.....	69
Figura 43: Zona de anchura insuficiente.....	71
Figura 44: Medición de alturas de la nube de puntos	72
Figura 45: Zonas de gálibo insuficiente	73
Figura 46: Densidad de farolas en un radio de 12 metros y 30 metros (Kernel Density)	76
Figura 47: Densidad de farolas en un radio de 12 metros y 30 metros (Point Density)	76
Figura 48: Zonas suficientemente iluminadas.....	77
Figura 49: Grafo de los ejes de calle del ámbito.....	78
Figura 50: Rutas 3D adoptando la coordenada vertical de la superficie topográfica rectificada	80
Figura 51: Rutas 3D adoptando la coordenada vertical de la superficie topográfica original.....	81
Figura 52: Rutas 3D antes (rojo) y después (verde) de la corrección	81
Figura 53: Diagrama de bloques del modelo de cálculo de pendientes.....	82
Figura 54: Mapa temático de pendientes de los subtramos.....	83
Figura 55: Diagrama de bloques del módulo de cálculo de obstáculos	84
Figura 56: Mapa temático con el tipo de obstáculo en los tramos	85
Figura 57: Tramos de ruta afectados por altura, anchura, escaleras, iluminación insuficiente	86
Figura 58: Puntos de interés evaluados en el análisis de redes	100
Figura 59: Ruta con múltiples destinos, siguiendo un orden establecido y optimizando la distancia.....	100
Figura 60: Pares de puntos donde el itinerario para usuario estándar es posible	104
Figura 61: Listado de orígenes y destinos para usuario estándar (origen punto A)	105
Figura 62: Consulta SQL para generar la matriz OD para usuario estándar	106
Figura 63: Matriz de distancias origen-destino para usuario estándar.....	107
Figura 64: Listado de facilities e incidents para usuario estándar (origen punto A)	109
Figura 65: Rutas duplicadas en la matriz origen-destino (usuario estándar)	110
Figura 66: Imagen del itinerario A-T para usuarios estándar exportada para la web.....	111
Figura 67: Pares de puntos donde el itinerario para usuario con movilidad reducida es posible.....	115
Figura 68: Listado de orígenes y destinos para usuario con movilidad reducida (origen punto A)	116
Figura 69: Consulta SQL para generar la matriz OD para usuario con movilidad reducida.....	116
Figura 70: Matriz de distancias origen-destino para usuario con movilidad reducida	117
Figura 71: Listado de facilities e incidents para usuario con movilidad reducida (origen punto A)	119
Figura 72: Rutas duplicadas en la matriz origen-destino (usuario con movilidad reducida).....	120
Figura 73: Imagen del itinerario A-L para usuarios con movilidad reducida exportada para la web	121
Figura 74: Pares de puntos donde el itinerario para usuario en silla de ruedas es posible	125
Figura 75: Listado de orígenes y destinos para usuario en silla de ruedas (origen punto A).....	126
Figura 76: Consulta SQL para generar la matriz OD para usuario con movilidad reducida.....	126
Figura 77: Matriz de distancias origen-destino para usuario en silla de ruedas.....	127
Figura 78: Listado de facilities e incidents para usuario en silla de ruedas (origen punto A)	129
Figura 79: Rutas duplicadas en la matriz origen-destino (usuario con movilidad reducida).....	130
Figura 80: Imagen del itinerario A-B para usuarios en silla de ruedas exportada para la web	131

Índice de tablas

Tabla 1: Evaluador de distancia de la red para usuario estándar	89
Tabla 2: Evaluador de restricción de altura de la red para usuario estándar	89
Tabla 3: Evaluador de distancia de la red para usuario con movilidad reducida	91
Tabla 4: Evaluador de restricción de altura de la red para usuario con movilidad reducida	91
Tabla 5: Evaluador de restricción de anchura de la red para usuario con movilidad reducida	92
Tabla 6: Evaluador de restricción de escaleras de la red para usuario con movilidad reducida	92
Tabla 7: Evaluador de restricción de iluminación de la red para usuario con movilidad reducida	93
Tabla 8: Evaluador de distancia de la red para usuario en silla de ruedas	95
Tabla 9: Evaluador de pendiente de la red para usuario en silla de ruedas	96
Tabla 10: Evaluador de restricción de altura de la red para usuario en silla de ruedas	96
Tabla 11: Evaluador de restricción de anchura de la red para usuario en silla de ruedas	97
Tabla 12: Evaluador de restricción de escaleras de la red para usuario en silla de ruedas.....	97
Tabla 13: Evaluador de restricción de iluminación de la red para usuario en silla de ruedas	98
Tabla 14: Evaluador de restricción de pendiente de la red para usuario en silla de ruedas	98

Índice de ecuaciones

Ecuación 1: Resolución espacial y resolución temporal en un escáner laser de tiempo de vuelo	21
Ecuación 2: Asignación de coordenada 0 a la cota inferior	22
Ecuación 3: Relación entre resoluciones <i>raster</i> y LTS.....	53
Ecuación 4: La frecuencia de muestreo permite detectar escalones	68
Ecuación 5: Fórmula utilizada para calcular la pendiente en cada tramo	82
Ecuación 6: Rutas descartando duplicados y origen=destino (usuario estándar).....	110
Ecuación 7: Rutas descartando duplicados y origen=destino (usuario con movilidad reducida)	120
Ecuación 8: Rutas descartando duplicados y origen=destino (usuario en silla de ruedas).....	130

1 Introducción

La presente tesis de máster ha sido desarrollada en el contexto del Proyecto PATRAC, “Patrimonio Accesible: I+D+i para una Cultura sin Barreras”, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación.

La información de partida con la que se ha trabajado proviene de dos fuentes: en primer lugar los datos obtenidos mediante el escaneado del ámbito con un Escáner Laser Terrestre y en segundo lugar la cartografía disponible de manera pública elaborada por el Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC).

El objetivo principal ha sido desarrollar una metodología que permita evaluar la accesibilidad física en entornos urbanos. Para ello se ha utilizado como caso de estudio el casco antiguo de Tossa de Mar (La Selva) y se ha tenido en especial consideración que la metodología fuera fácilmente extrapolable a entornos más extensos.

Como objetivo secundario, se ha desarrollado una metodología para utilizar la nube de puntos obtenida mediante un Escáner Láser Terrestre (en inglés *Laser Terrestrial Scanner* o LTS) para la obtención de la topografía y la identificación de los obstáculos del ámbito delimitado por la fortificación medieval, teniendo en cuenta que dicha metodología puede aplicarse también a datos obtenidos de vuelos ALSM (*Airborne Laser Swath Mapping*) mediante LIDAR (*Light Detection and Ranging*).

También como objetivo secundario se ha evaluado la posibilidad de utilizar información actualmente disponible de manera pública para obtener resultados comparables.

1.1 Evaluación de la accesibilidad en entornos urbanos

La evaluación de la accesibilidad en entornos urbanos nos permite hacer un diagnóstico de la adecuación del espacio urbano a su uso por parte de los ciudadanos, independientemente de su discapacidad.

A partir de la evaluación de la accesibilidad se pueden establecer las medidas correctoras necesarias; en este sentido se están llevando a cabo en Cataluña diversos Planes de Accesibilidad Municipales, partiendo de unos planteamientos comunes (Departament de Benestar Social, 2002).

La disposición transitoria segunda de la Orden VIV/561/2010 establece que los espacios públicos urbanizados existentes deberán adaptarse, salvo excepciones, a las nuevas disposiciones antes del 1 de enero de 2019 (Ministerio de Vivienda, 2010).

Para su aplicación es necesario disponer de las herramientas necesarias para poder evaluar de la manera más objetiva posible la accesibilidad del municipio, identificar las deficiencias subsanables, evaluar la eficacia de las medidas correctoras propuestas y finalmente realizar el seguimiento de las contingencias que puedan aparecer.

La presente tesis intenta aportar una metodología para evaluar la accesibilidad en zonas urbanizadas basada en tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (en adelante, SIG) con la aportación adicional de técnicas de *remote sensing* basadas en la información que proporcionan las nubes de puntos.

1.1.1 Aproximación metodológica para la obtención datos del LTS

En primer lugar, cabe destacar que la nube de puntos con la que se trabajó fue obtenida en una campaña para realizar el levantamiento de las fachadas en alzado, de manera que los puntos que representaban el suelo son un producto secundario de este trabajo y por lo tanto no tienen el detalle que les correspondería si se hubiera escaneado este elemento *ex professo*. Aún así, el detalle se ha mostrado suficiente para la aproximación metodológica que se propone.

La información de la nube de puntos proporcionada por el LTS se ha utilizado para dos objetivos principales:

- La obtención de la topografía de las calles sobre la que posteriormente evaluar las pendientes.
- La detección de ciertos elementos como los escalones o las fachadas.

Para llevar a cabo estos dos objetivos se ha trabajado la topografía en formato *raster* para poder realizar análisis en 2,5 dimensiones, asignando a cada *pixel* el valor de la altura que le corresponde.

Mediante esta transformación ha sido posible realizar análisis de pendientes, de vecindad y de caracterización de superficies que no son posibles a partir de la nube de puntos. Otras ventajas añadidas son que las herramientas informáticas son capaces de procesar las imágenes *raster* a mucha mayor velocidad que las entidades tipo

punto al estar los *pixels* dispuestos en una malla regular y que los requerimientos de almacenamiento son mucho menores.

1.1.2 Aproximación metodológica para el análisis de redes

El estudio de la movilidad dentro de los espacios urbanizados se caracteriza por la multiplicidad de itinerarios que son posibles para visitar las distintas ubicaciones. El estudio de la accesibilidad, como caso específico, no es ajeno a esto puesto que puede ser posible acceder a un destino desde un punto de origen siguiendo distintos itinerarios con distintos grados de accesibilidad.

El análisis de rutas óptimas se centra principalmente en la obtención del itinerario con el mínimo coste (tiempo, dinero, distancia) que permite visitar las ubicaciones deseadas en un orden preestablecido e incluso optimizar el orden de estas visitas. En estos análisis, los impedimentos para el análisis del movimiento en la red son dos tipos:

- Impedimentos en función de una característica determinada, como por ejemplo el gálibo de un puente que impide el paso de un cierto tipo de camiones. Llamaremos a estos impedimentos intrínsecos.
- Barreras o elementos de bloqueo temporal de la circulación en un tramo de la red, como por ejemplo la realización de obras, accidentes o retenciones. Llamaremos a estos impedimentos circunstanciales.

Para aprovechar las herramientas disponibles para el análisis de redes de movilidad o de servicios y aplicarlas al análisis de accesibilidad en entornos urbanos se ha tenido que modelar la realidad existente desde el punto de vista de la accesibilidad acomodando estos dos tipos de impedimentos para tener en cuenta los distintos tipos de obstáculos, haciendo las siguientes simplificaciones:

- a) Se ha utilizado una red unimodal, de manera que no se considera como accesible un punto al que pueda llegarse mediante transporte público o privado. Se han considerado todas las calles peatonales.
- b) Se considera que los tramos que tienen algún impedimento no son transversables, sin distinguir su grado de accesibilidad, por lo que el cálculo elegirá siempre la ruta más corta que no tenga impedimentos.
- c) No se considera el sentido del movimiento dentro de la red.

- d) Se han modelado sendas redes para cada tipo de usuario en función de su discapacidad.

La primera simplificación se ha hecho por falta de datos de transporte público y de ubicación de plazas de aparcamiento adaptadas, aunque puesto que en el caso de estudio todos los itinerarios son peatonales no tiene ninguna incidencia. En caso de disponer de los datos, es trivial implementar una red multimodal.

La segunda simplificación considera, para ciertos tipos de usuario, un escalón o una pendiente superior a un determinado valor como no transversables. No se considera que el usuario pueda viajar por una pendiente superior o subir un escalón si ello reduce la distancia del recorrido. Otras metodologías podrían tener en cuenta este aspecto.

La tercera simplificación comporta que en la evaluación no se distinga entre pendientes ascendentes y descendentes.

Finalmente, la cuarta simplificación es fruto de las limitaciones de funcionamiento de la herramienta informática utilizada que necesita definir una red distinta para evaluar cada tipo de discapacidad.

1.2 Metodología seguida en los trabajos realizados

Los trabajos realizados para obtener los resultados se detallan brevemente a continuación.

Se ha utilizado una batería de técnicas basadas en Sistemas de Información Geográfica y se han elegido las soluciones que fueran más fácilmente extrapolables a ámbitos mucho mayores. También se ha evaluado en todos los casos la posibilidad de utilización de información de dominio público siempre que fuera factible.

1.2.1 Metodología para la obtención de la topografía

Inicialmente se ha contemplado la posibilidad de utilizar la información de los puntos altimétricos del ICC (apartado 5.1) pero se ha comprobado que la información que proporciona no es utilizable, principalmente por la escasa densidad de los puntos y por el hecho que una parte de ellos corresponde a las cotas superiores de edificaciones.

El principal escollo para la obtención de la topografía es la presencia de elementos en la nube de puntos que no corresponden al suelo. Podemos encontrar dos tipos de elementos:

- a) Puntos dentro del perímetro de las fachadas y que por lo tanto se pueden descartar para la generación de la topografía de la calle.
- b) Puntos en las calles que corresponden a la detección de elementos (árboles, vehículos, personas, voladizos, mobiliario urbano, etc.) que no corresponden a su topografía.

Los puntos del primer grupo son triviales de filtrar una vez reconocido el perímetro de las edificaciones; los segundos son mucho más difíciles de distinguir por métodos automáticos.

Para identificar las zonas donde podemos encontrar puntos que representen la topografía con un alto grado de confianza se ha clasificado el *raster* según distintos criterios (apartado 5.2): desviación estándar (apartado 5.2.1), rango (apartado 5.2.2), pendiente (apartado 5.2.3) y curvatura tridimensional (apartado 5.2.4). También se han clasificado por métodos menos convencionales como la dimensión fractal (5.2.5). Esta operación es parecida a la teledetección orientada a objetos pero en este caso la red neural utilizada es la del operador que identifica los contornos. En futuras investigaciones se podría entrenar un módulo para realizar la operación automáticamente.

Una vez identificadas las zonas consideradas válidas según los cuatro criterios, se han digitalizado una serie de puntos y se les ha asignado la coordenada Z del píxel correspondiente a su proyección en planta, como si se tomaran muestras con un “teodolito virtual” (apartado 5.3).

A partir de estos puntos se ha podido generar un DTM (apartado 5.3.1) y un TIN (apartado 5.3.2).

La topografía obtenida se ha comparado con la disponible en el ICC y se ha comprobado que en los puntos sin edificación concordaban con un error imperceptible mientras que en las zonas con edificación la topografía obtenida con esta metodología ofrecía mejores resultados.

Adicionalmente se ha desarrollado un módulo que limpia los errores de manera recursiva, pero se ha descartado su utilización porque sólo ha obtenido resultados correctos en un 90% de los casos aproximadamente y se ha descartado para la presente investigación.

1.2.2 Metodología para la detección de obstáculos

Para identificar los obstáculos desde el punto de vista de la accesibilidad (apartado 6) se ha utilizado una metodología distinta para cada tipo de elemento.

Estos elementos se han comparado con la cartografía del ICC (para la obtención de la cual se realizó un trabajo de campo complementario en su momento) y los resultados han sido muy exactos, superando en algunos casos incluso a estos datos en cuanto a exactitud.

Para la identificación de pendiente se ha utilizado la pendiente como medida para detectar cambios bruscos de altura (apartado 6.1), con lo que se pueden apreciar visualmente elementos rectilíneos en planta que corresponden a las fachadas, muros, torres y muralla, algunos de los cuales no aparecen en la cartografía del ICC.

Para la identificación de las escaleras (apartado 6.2), la resolución del LTS ha permitido utilizar también la pendiente para visualizar la proyección en planta de las contrahuellas, utilizando unos valores más bajos que con las fachadas como umbral. En este caso la identificación ha sido también excelente utilizando como referencia la cartografía del ICC.

La nube de puntos también se ha utilizado para detectar zonas con altura insuficiente mediante la exploración del modelo 3D (apartado 6.4).

Por otra parte, las zonas de anchura insuficiente (apartado 6.3) e iluminación inadecuada (apartado 6.5) se han obtenido mediante la utilización de herramientas convencionales de SIG a partir de la geometría de las fachadas en el primer caso y de la ubicación de las farolas en el segundo caso.

1.2.3 Metodología para la evaluación de red

Para la construcción de la red se ha preparado la geometría del grafo que la representa para acoger la información necesaria (apartado 7).

Se han determinado en primer lugar los ejes de calle a partir de la cartografía del ICC, contrastada con la información obtenida del LTS (apartado 7.1).

Para ajustar los ejes de calle a la topografía se han realizado dos operaciones: se han subdividido los tramos en segmentos cortos o subtramos (apartado 7.2) y se han convertido los tramos en entidades tridimensionales a partir de la topografía (apartado 7.3).

A partir de esta geometría se ha incorporado a cada subtramo la información de su pendiente (apartado 7.4) y de la presencia de obstáculos correspondientes a escaleras, pasos con altura insuficiente, pasos con anchura insuficiente y zonas de iluminación inadecuada (apartado 7.5).

Una vez obtenida la geometría con la información necesaria para efectuar el análisis de redes, se han definido tres redes con distintos parámetros en función del tipo de discapacidad a evaluar (apartado 8):

- Usuario estándar (apartados 8.1 y 9.2)
- Usuario con movilidad reducida (apartados 8.2 y 9.3)
- Usuario en silla de ruedas (apartados 8.3 y 9.4)

Para estudiar los itinerarios accesibles (apartado 9) se han determinado unos puntos de interés predeterminados (apartado 9.1) y se han obtenido tres tipos de resultados para cada caso evaluado:

- En primer lugar, el cálculo de la ruta óptima entre múltiples puntos arbitrarios para los tres casos evaluados (apartados 9.2.1, 9.3.1 y 9.4.1 respectivamente), que permite generar un itinerario a medida y ubicar barreras presentes de manera circunstancial, como por ejemplo unas obras en la vía que impiden el paso temporalmente.
- En segundo lugar, la obtención de la matriz origen-destino entre los puntos de interés predeterminados (apartados 9.2.2, 9.3.2 y 9.4.2 respectivamente), que permite identificar cuellos de botella y desconexiones en la red que facilita dirigir las posibles intervenciones hacia los aspectos que conllevan un mayor mejora de accesibilidad.

- Finalmente, en tercer lugar, la generación automática de las imágenes de los itinerarios entre los puntos predeterminados para su difusión mediante la inclusión en una página web (apartados 9.2.3, 9.3.3 y 9.4.3 respectivamente).

Mediante esta metodología se consigue por una parte realizar una evaluación de la accesibilidad del entorno estudiado y también conseguir unos productos de salida que faciliten el conocimiento del entorno a los usuarios.

La metodología utilizada es adaptable a entornos urbanos más extensos con algunas modificaciones por el hecho que todas las calles del caso de estudio se han considerado peatonales a efectos de este trabajo.

2 Estado del arte

2.1 Accesibilidad y análisis de redes

Para poder evaluar la accesibilidad con herramientas SIG, en primer lugar debemos crear un modelo que nos permita traducir las características de los espacios que queremos evaluar a un conjunto de entidades con atributos que pueda manejar el programa (Zeiler, 1999).

En el análisis de redes en programas SIG se acostumbra utilizar la altura para modelar las intersecciones sin conectividad (por ejemplo el caso de puentes o túneles). En algunos ejemplos se modela la pendiente de las redes mediante datos obtenidos en trabajo de campo (Price, 2008) o se utiliza la información topográfica para obtener la pendiente a partir de los puntos extremos (Price, 2009).

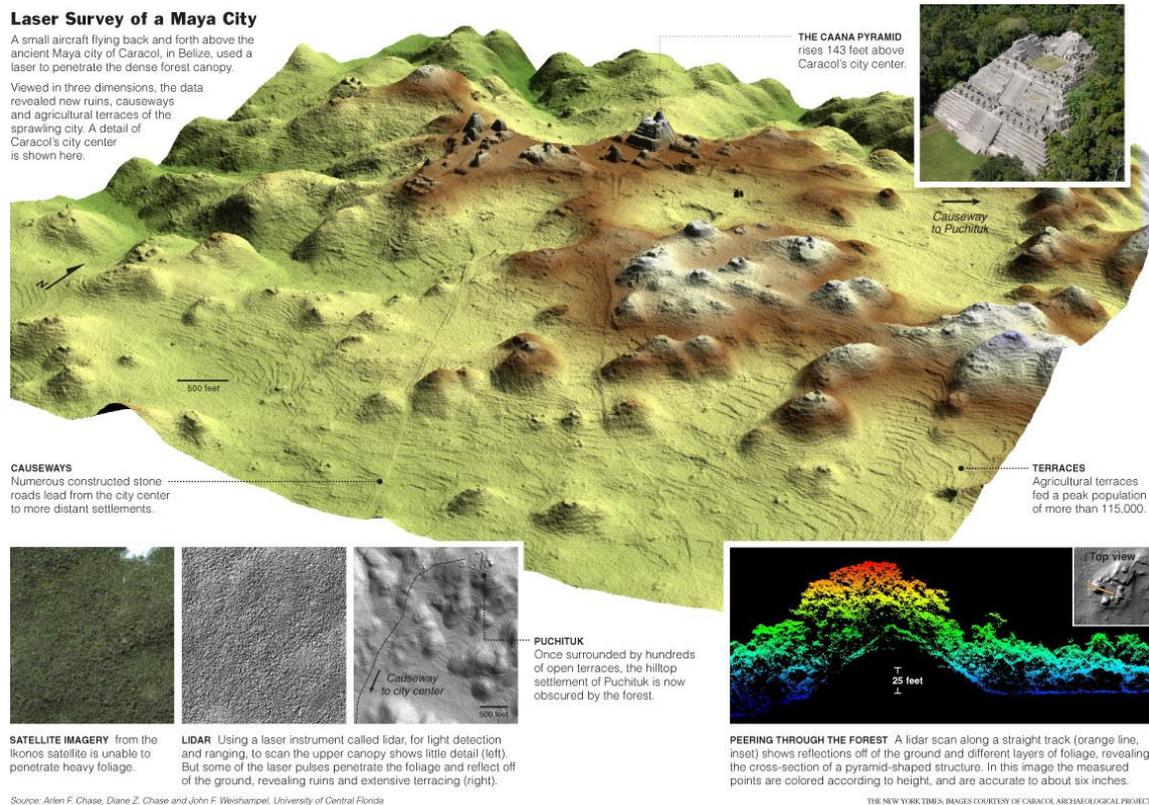
Por lo que hace referencia a la caracterización de la accesibilidad, la metodología POLIS (POLIS, 2008) utiliza el paradigma del *Building Accessibility Model* (BAM) para modelar la accesibilidad de los elementos de los edificios y de conjuntos de elementos hasta llegar a evaluar el edificio en conjunto.

Siguiendo una metodología parecida, encontramos propuestas de evaluación de edificios patrimoniales (del Moral, 2006) siguiendo la normativa específica de aplicación en España (del Moral & Delgado, 2010).

2.2 Topografía

La utilización de tecnologías de detección y caracterización (entre ellas el escáner láser) ha aportado grandes avances en Medicina y en otras disciplinas como la Arqueología, dónde el uso del LIDAR está revolucionando la detección ruinas y alteraciones topográficas ocultas bajo la cobertura vegetal selvática (Figura 1), sustituyendo largas campañas de trabajo de campo (Weishampel, Patrick, Hightower, Chase, & Chase, 2010).

Figura 1: Detección de ruinas Maya bajo la cobertura vegetal (fuente: NY Times¹)



La caracterización de superficies topográficas a través su clasificación automática de manera paramétrica ha experimentado una gran evolución recientemente mediante el uso programas informáticos².

Se pueden clasificar los elementos en los siguientes tipos (Wood, 1996):

- Fosas (*pits*)
- Cauces (*channels*)
- Desfiladeros (*passes*)
- Crestas (*ridges*)
- Cumbres (*peaks*)
- Regiones llanas (*planar regions*)

A partir de estos trabajos, se ha avanzado en la caracterización de superficies mediante redes, especialmente desde el punto de vista hidrológico (Pfaltz, 1976), con

¹ Véase <http://www.nytimes.com/2010/05/11/science/11maya.html>

² Estas caracterizaciones pueden estudiarse con el programa de libre distribución LandSerf (véase <http://www soi.city.ac.uk/~jwo/landserf/>)

la ayuda de herramientas informáticas (Wood, 2000), mediante las cuales se modelan las redes de cuencas y de desfiladeros y también su conectividad a partir de un DTM (Schneider, 2005).

Otro enfoque más novedoso es el análisis multiescala de las superficies para averiguar sus dimensiones fractales y el empleo de lógica difusa para su caracterización (Fisher, 2004).

Para la depuración de nubes de puntos procedentes de LIDAR para obtener la topografía o las construcciones cabe destacar las técnicas de limpieza mediante estudio de la pendiente (Vosselman, 2000) y depuradas mediante la incorporación de filtros (Sithole, 2001).

Otras técnicas trabajan sobre entidades tipo malla triangular irregular (TIN), adaptando al TIN generado a partir de la nube obtenida una nueva malla (Axelsson, 2000) o mediante la reducción progresiva del número de nodos (Kersting & Kersting, 2005)

Otros autores proponen trabajar directamente con la nube de puntos, filtrando los puntos que no corresponden a la topografía (Błaszczak-Bąk, Janowski, Kamiński, & Rapiński, 2010).

Para distinguir entre topografía y objetos, se ha propuesto el uso de redes neurales artificiales combinado con análisis multiescala (Priestnall, Jaafar, & Duncan, 2000), el uso de *wavelets* (Bartels & Wei, 2006) y el desarrollo del algoritmo de segmentación llamado *skewness balancing* (Bartels, Wei, & Mason, 2006). Estas propuestas van encaminadas a la clasificación automática de información LIDAR que está empezando a generalizarse con su incorporación al paquete *eCognition Developer 8* de *Definiens*.

2.3 Marco legislativo

La sensibilidad con los aspectos relacionados con la accesibilidad aparece ya en el artículo 49 la Constitución Española de 1978:

“Los poderes públicos realizarán una política de previsión, tratamiento, rehabilitación e integración de los disminuidos físicos, sensoriales y psíquicos, a los que prestarán la atención especializada que requieran y los ampararán especialmente para el disfrute de los derechos que este Título otorga a todos los ciudadanos.”

La Ley 13/1982, de 7 de abril, de Integración Social de los Minusválidos (Jefatura del Estado, 1982) y posteriormente la Ley 51/2003, de 2 de diciembre, de igualdad de oportunidades, no discriminación y accesibilidad universal de las personas con discapacidad (Jefatura del Estado, 2003) cimentan la necesidad conseguir el mayor grado de accesibilidad para todas las personas.

Recientemente, se ha aprobado una modificación del Código Técnico de la Edificación³ que lo modifica para regular la accesibilidad dentro de los edificios y en el acceso a los mismos (Ministerio de Vivienda, 2010).

De manera casi simultánea a la regulación de la accesibilidad en las edificaciones, la accesibilidad de los espacios públicos ha sido regulada recientemente⁴ (Ministerio de Vivienda, 2010) complementando la reglamentación existente hasta la fecha⁵ (Ministerio de la Presidencia, 2007).

Estas regulaciones se añaden a las normas UNE 170001-1:2007 (AENOR, 2007) y UNE 170001-2:2007 (AENOR, 2007) que ya estaban vigentes.

La mayoría de las autonomías han legislado también en materia de accesibilidad. En el caso de la Comunidad Autónoma de Cataluña es de obligado cumplimiento el Codi

³ Real Decreto 173/2010, de 19 de febrero, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, en materia de accesibilidad y no discriminación de las personas con discapacidad.

⁴ Orden VIV/561/2010, de 1 de febrero, por la que se desarrolla el documento técnico de condiciones básicas de accesibilidad y no discriminación para el acceso y utilización de los espacios públicos urbanizados

⁵ Real Decreto 505/2007, de 20 de abril, por el que se aprueban las condiciones básicas de accesibilidad y no discriminación de las personas con discapacidad para el acceso y utilización de los espacios públicos urbanizados y edificaciones

d'accessibilitat⁶ (Departament de Benestar Social, 1995) que desenvolupa la Llei de promoció de l'accessibilitat i de supressió de barreres arquitectòniques⁷ (Generalitat de Catalunya, 1991).

Por otra parte, en Cataluña, el Decret d'Habitabilitat⁸ ha incorporado también muchos conceptos en relación con la accesibilidad (Departament de Benestar Social, 2009) de la misma forma como lo ha hecho el CTE demostrando la cada vez mayor importancia de conseguir unos espacios accesibles dentro y fuera de los edificios.

⁶ Decret 135/1995, de 24 de març, de desplegament de la Llei 20/1991, de 25 de novembre, de promoció de l'accessibilitat i de supressió de barreres arquitectòniques, i d'aprovació del Codi d'accessibilitat

⁷ Llei 20/1991, de 25 de novembre, de promoció de l'accessibilitat i de supressió de barreres arquitectòniques

⁸ Decret 55/2009, de 7 d'abril, sobre les condicions d'habitabilitat dels habitatges i la cèdula d'habitabilitat

3 Incorporación de la información de partida al SIG

Se ha incorporado la información procedente del LTS y también cartografía adicional de dominio público para poder contrastarla con los resultados obtenidos con el LTS y también para explorar la posibilidad de replicar el trabajo realizado únicamente con estas fuentes.

3.1 Importación de la información de la nube de puntos

La resolución de los detalles proporcionada por el LTS nos permite analizar las características del entorno con gran precisión utilizando métodos automáticos; sin embargo, debido al sistema de captura de datos del LTS, encontramos tres problemas principales que nos impiden generar una topografía correcta de manera directa:

- Los puntos obtenidos no incorporan ningún tipo de referencia espacial, ni horizontal ni vertical, por lo que necesitan ser georeferenciados.
- Hay zonas que no contienen la información de ningún punto y por lo tanto no disponemos de datos en algunas localizaciones. Esto se produce debido a la existencia de zonas de sombra porque objetos fijos o móviles ocluyen la trayectoria del laser del escáner. Debido a esto los datos deberán ser interpolados.
- Finalmente, el escáner registra objetos (árboles, personas, automóviles, mobiliario urbano, voladizos...) pero es incapaz de distinguirlos del suelo para obtener una topografía correcta. Para solventar este problema será necesario filtrar la nube de puntos para descartar estos objetos.

En el escáner de tiempo de vuelo utilizado, la resolución está limitada por la mínima fracción de tiempo que es capaz de distinguir, siendo como máximo el producto de la velocidad de la luz (constante) por la mitad del tiempo de vuelo (Ecuación 1):

Ecuación 1: Resolución espacial y resolución temporal en un escáner laser de tiempo de vuelo

$$d = c \cdot t/2$$

La información procedente del LTS se ha incorporado a *ArcGIS* Versión 9.3.1. Para gestionar la información se han utilizado las extensiones *Spatial Analyst*, *3D Analyst* y *Network Analyst*.

La información de la nube de puntos se ha obtenido en un archivo de texto ASCII exportado desde los programas *GeoMagic* y *Pointools*, con los que se ha trabajado la geometría mediante operaciones de mallado y filtro.

El contenido de este archivo de texto es un listado con los 1.823.336 puntos del ámbito estudiado donde cada fila del archivo corresponde a la información de un único punto. En cada línea encontramos las tres coordenadas del punto en el espacio (x,y,z) separadas por comas y con el separador decimal en formato anglosajón:

Figura 2: Archivo ASCII procedente del LTS

```
[...]  
-180.000,-188.900,-15.100  
-180.000,-188.500,-15.157  
-180.000,-188.400,-15.157  
-180.000,-188.300,-15.252  
-180.000,-177.000,-13.786  
[...]
```

Como se puede apreciar (Figura 2), la resolución espacial de esta retícula puntos es de 10 centímetros en proyección horizontal y de 1 milímetros en elevación.

Como tratamiento previo para rectificar la elevación estos puntos, y debido que *ArcGIS* no es capaz de manejar el volumen de datos contenido en el archivo ASCII, el archivo se ha importado en una la base de datos *Microsoft Access* dónde se han modificado las coordenadas Z, de manera que a la coordenada menor (-15,511) se le ha asignado la cota ± 0 (Ecuación 2):

Ecuación 2: Asignación de coordenada 0 a la cota inferior

$$Z_{nueva} = Z_{original} - \text{Min}(Z) \quad \forall Z \in \text{puntos LTS}$$

Una vez modificada la coordenada Z se ha exportado el listado de puntos nuevamente a un fichero ASCII y se han importado en *ArcGIS*, como entidades tipo *MultiPoint* y como entidad tipo *raster*, para poder tratar la información topográfica con distintas metodologías.

3.2 Cartografía del Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC)

Los productos cartográficos disponibles en el Instituto Cartográfico de Cataluña que se han utilizado son los siguientes:

Base topográfica 1:5.000 (hoja 307-110)

- Formato: DXF 3D
- Fecha del vuelo: Mayo de 2001

Ortofoto 1:5.000 (hoja 307-110)

- Formato: MrSID con compresión 10
- Resolución de píxel de 0,50 metros (4638x6941)
- Fecha del vuelo: Junio de 2008

Cartografía 1:1.000 (Proyecto 08,09-2004 código 00119771600)

- Formato: SHP 3D
- Fecha del vuelo: Agosto de 2004
- Fecha de revisión de campo: Diciembre de 2005

La descripción del contenido de estos archivos se ha obtenido en formato PDF en la web del ICC⁹(ICC, 2009).

La información está dividida en:

- Puntos
- Líneas
- Áreas
- División en hojas del ICC

La información del archivo SHP obtenido de la web del ICC está estructurada de manera que las entidades disponen de un campo llamado "CAS" los prefijos del contenido del cual son los siguientes:

- Orografía y relieve ORO_*
- Modelo de elevaciones MED_*

⁹ <http://www.icc.cat/cat/Home-ICC/Inici/Cartografia/Documentacio/Especificacions-tecniques>

- Hidrografía y obras hidráulicas HID_*
- Vegetación y usos del suelo VEG_*
- Comunicaciones y vialidad COM_*
- Construcciones y poblaciones CON_*
- Energía y telecomunicaciones ENE_*
- Toponimia y anotaciones TOP_*
- Registros REG_*

Se ha cortado la cartografía para obtener únicamente las entidades que forman parte del ámbito de estudio y se han filtrado las siguientes entidades mediante el comando *Selection > Select by Attributes* para utilizarse como referencia para la georeferenciación de otra información (Figura 3):

- Fachadas CON_01*
- Porches CON_02*
- Medianeras CON_03*
- Vertientes CON_04*
- Cubiertas CON_07*
- Ruinas CON_10*
- Muros CON_14* + CON_15* + CON_18
- Desniveles y barandillas CON_20
- Escalones CON_23
- Cumbreras CON_29

Figura 3: Información vectorial y raster del ICC importada, filtrada y recortada

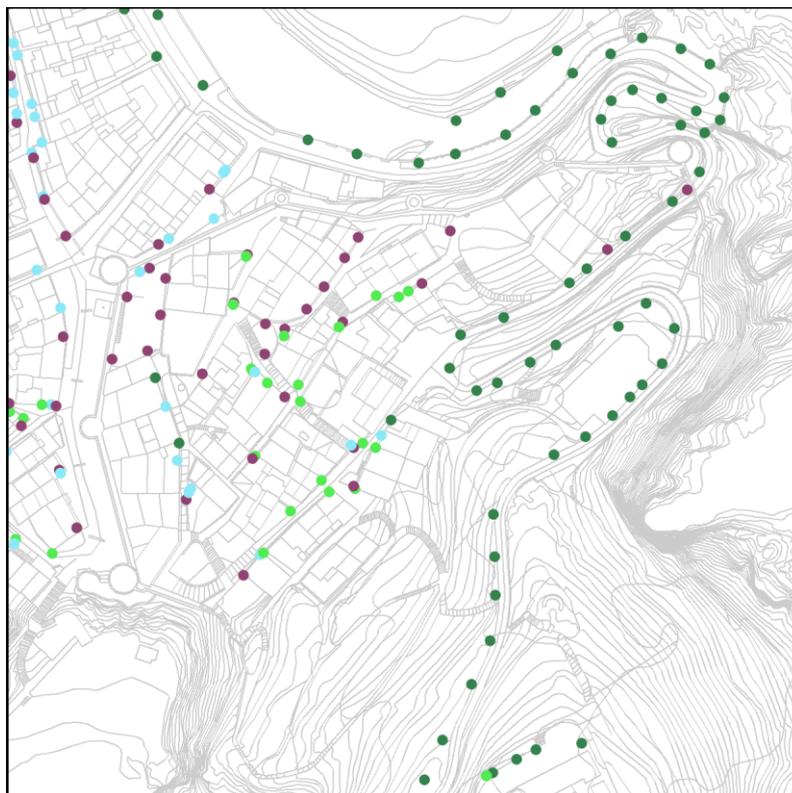


También se ha importado la información de puntos altimétricos 3D y la ortofoto para poder trabajar con ella sin depender de la cartografía WMS del ICC (Figura 3).

3.3 Cartografía del Ayuntamiento de Tossa de Mar

Se han importado la posición de las farolas facilitada por el Ayuntamiento de Tossa de Mar. Sólo se ha utilizado la información de su localización de manera que los campos de información que contiene se han descartado (Figura 4).

Figura 4: Ubicación del alumbrado proporcionada por el Ayuntamiento de Tossa de Mar



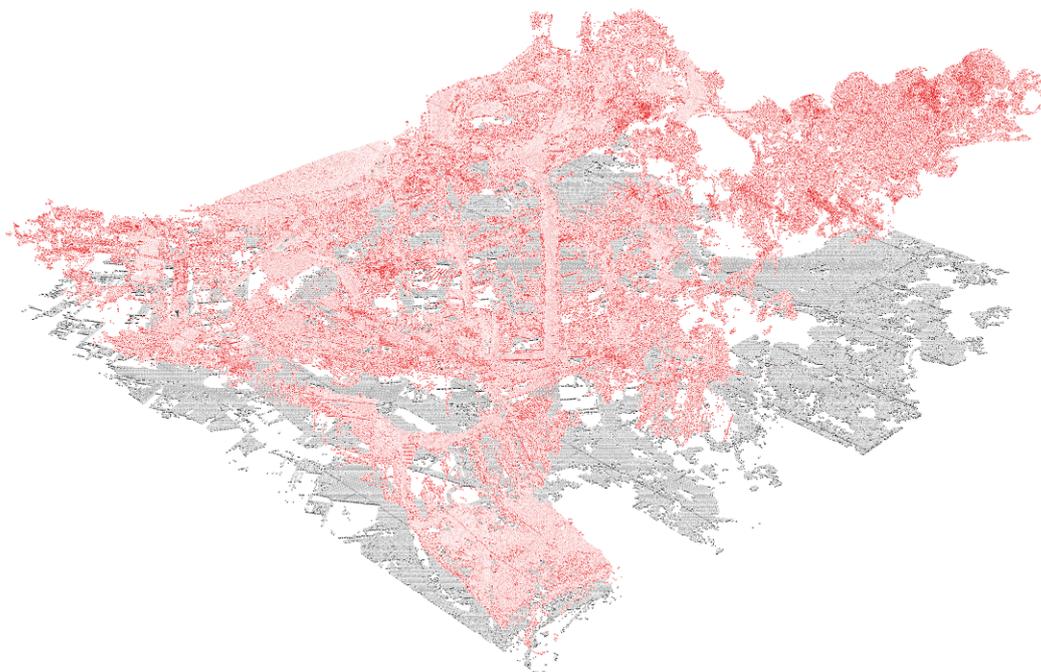
También se ha incorporado la información de planeamiento obtenida de la web del Ayuntamiento (Ajuntament de Tossa de Mar, 2010) para poder disponer de los límites de propiedad entre espacio público y privado. Como la cartografía es una imagen ordinaria sin referencia espacial, se ha tenido que georeferenciar utilizando como referencia la cartografía del ICC (Figura 5).

4 Tratamiento de los datos del LTS

4.1 Conversión a entidades de tipo punto

Se ha realizado la importación a entidades tipo punto (Figura 6), a partir del archivo de texto ASCII mediante la orden *3D Analyst Tools > Conversion > From File > ASCII 3D to Feature Class* indicando que el formato en el archivo de texto es XYZ y seleccionando *MultiPoint* como tipo de entidades a generar en contraposición a entidades tipo *Point*.

Figura 6: Nube de puntos importada en ArcGIS a partir del archivo ASCII (2D y 3D)



A diferencia de las entidades tipo *Point*, que consumen un registro para cada elemento con sus campos correspondientes, las entidades tipo *MultiPoint* son entidades también de tipo punto que se almacenan de manera conjunta en *clusters* de hasta 5.000 puntos en un solo registro para ahorrar espacio y tiempo de procesamiento.

La ventaja de utilizar este tipo de entidades es que tendremos únicamente 414 registros en comparación con los 1.823.336 registros que hubieran consumido las entidades tipo punto.

Como contrapartida, no podemos asignar campos de información a cada punto de manera individualizada. Sin embargo, para la metodología que estamos utilizando, esto no supone ningún inconveniente puesto que tan solo nos interesa la coordenada Z, que está implícita en la geometría del punto.

Al carecer de georeferenciación, los puntos se importan el origen de coordenadas situado en la intersección del ecuador con el meridiano de Greenwich. Para poder ubicar la nube de puntos en sus coordenadas correctas, se puede utilizar la herramienta *Spatial Adjustment* (sin utilizar rectificación) mediante la cual se determinan las localizaciones algunos puntos origen (en la nube de puntos) y sus destinos correspondientes (utilizando como referencia la información del ICC). Alternativamente, se pueden convertir los puntos a una entidad de tipo *raster* y georeferenciar este *raster* con la herramienta *Georeferencing*; esta segunda opción ha sido la utilizada debido a su mayor facilidad para identificar elementos en el *raster* en comparación con la nube de puntos. Posteriormente se puede convertir el *raster* nuevamente a puntos mediante la orden *Conversion Tools > From Raster > Raster to Point*.

4.2 Conversión a entidad de tipo raster

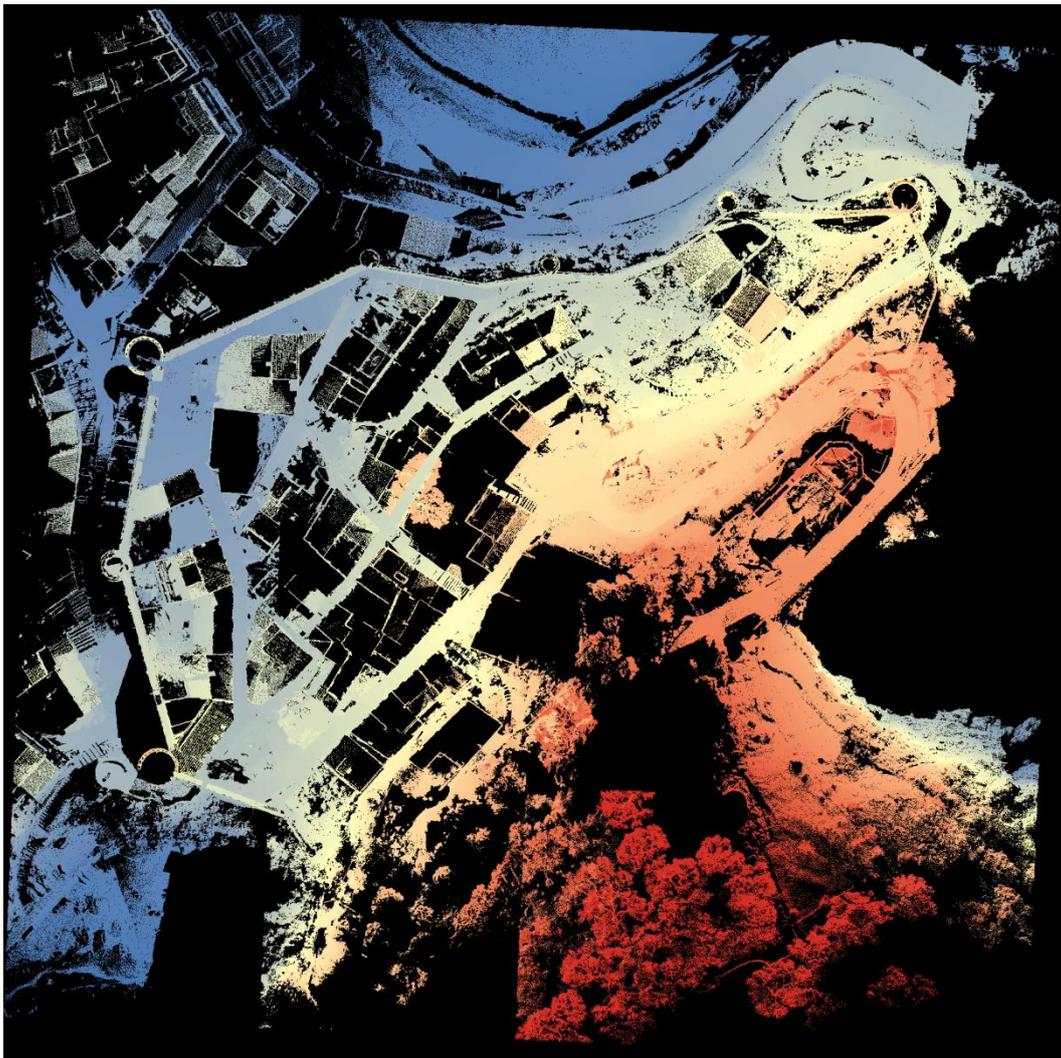
Trabajar con entidades tipo *raster* tiene algunas ventajas para el caso que nos ocupa:

- La información de la nube de puntos procedente de *GeoMagic* ya está ordenada en una estructura de retícula y por lo tanto no se introducen distorsiones de muestreo adicionales en la conversión.
- Las herramientas de georeferenciación son mucho más potentes cuando trabajan con este tipo de entidades que con entidades vectoriales.

El *raster* se obtiene de la nube de puntos anteriormente importada a *MultiPoint* mediante la instrucción *Conversion Tools > To Raster > Point to Raster*. Como campo para determinar el valor del *raster* elegimos el de *shape*, con lo cual se asignará la coordenada Z del punto al valor de cada *pixel* en función de la posición del punto correspondiente en planta. Para evitar distorsiones pediremos que la herramienta elija el valor más frecuente de la coordenada Z y que genere un *raster* de la misma resolución que la nube de puntos (0,1 metros).

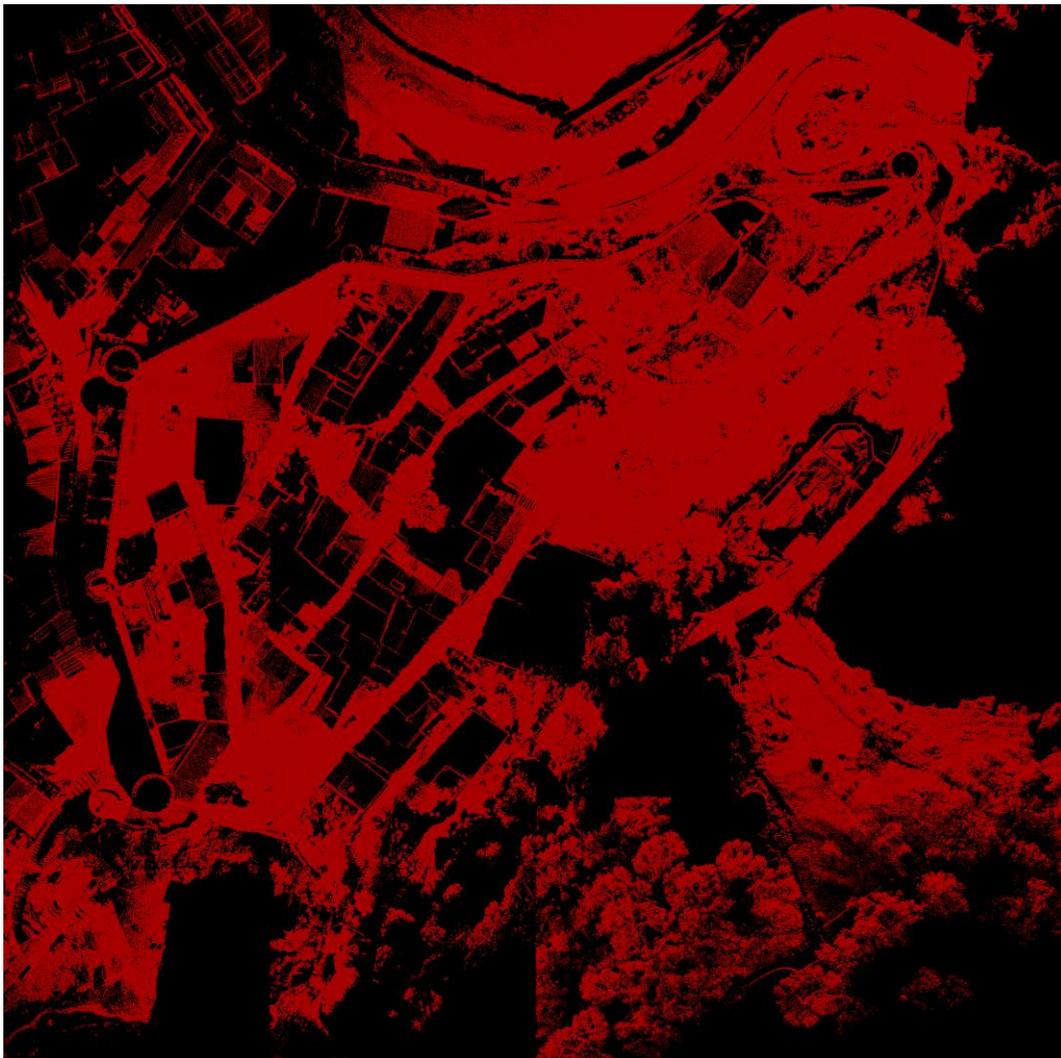
De la importación como *raster* se ha obtenido una imagen de 2001 x 2001 *pixels* (200,1 x 200,1 metros), donde el valor del *pixel* corresponde con la coordenada Z de los puntos importados y las zonas donde no hay puntos son representadas como valores nulos (Figura 7).

Figura 7: Raster de elevaciones en falso color



Para comprobar la correcta importación, se ha ejecutado de nuevo la instrucción *Conversion Tools > To Raster > Point to Raster*, en este caso se ha indicado que se genere un *raster* con idénticas características pero con la cuenta del número de puntos de los cuales adopta los valores cada píxel. El resultado debería ser un *raster* compuesto únicamente de 1.823.336 *pixels* de valor 1 y el resto valores nulos, que es el resultado que se ha obtenido (Figura 8).

Figura 8: Numero de puntos muestreados por píxel (rojo = 1 ; negro = sin datos)



Una vez importado el *raster* se ha georeferenciado utilizando como referencia la cartografía del ICC.

Dado que el escaneado se hizo a nivel de calle, no disponemos de lecturas de las cubiertas ni del interior de los edificios. La cobertura de la región analizada ha sido del 45,54% ($1.823.336 / 2.001^2 \times 100$) y por lo tanto el 54,49% de los *pixels* tienen el valor nulo.

Para interpolar los valores de los puntos dónde no hay datos (Longley, Goodchild, Maguire, & Rhind, 2010), se han ensayado distintos algoritmos que proporciona *ArcGIS* para estimar estos valores a partir de los valores conocidos de las entidades *MultiPoint*. Con estos ensayos se ha pretendido averiguar qué modelo se adapta mejor para predecir los valores de las zonas donde no hay datos.

Debido a que *ArcGIS* solamente puede realizar la interpolación a partir de entidades de tipo punto y no de tipo *raster*, ha sido necesario en convertir el *raster* previamente georeferenciado a una nube de puntos mediante la herramienta *Conversion Tools > From Raster > Raster to Point* de manera que obtenemos una nube de puntos georeferenciada con un campo llamado GRID_CODE correspondiente al valor del *pixel* y con posición coincidente la del centro del *pixel*.

Se han evaluado cuatro métodos deterministas (IDW, Spline, Natural Neighbor y Trend) y un método geoestadístico (Kriging). También se ha evaluado un método enfocado a obtener superficies topográficamente correctas (Topo to Raster).

Para evaluar la calidad de los resultados obtenidos se ha aplicado la herramienta *Spatial Analyst Tools > Local > Cell Statistics* y se han comparado los resultados de la interpolación con los del *raster* original mapeando la desviación estándar en cada punto.

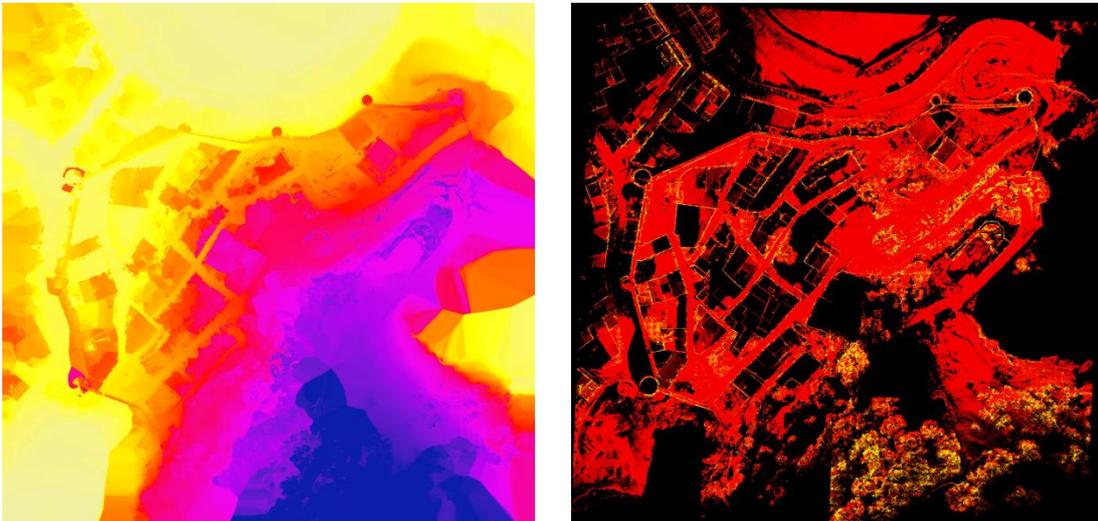
Finalmente, se ha optado por el algoritmo Natural Neighbor ya que produce unos resultados comparativamente más ajustados para el conjunto de datos con los que se ha trabajado.

4.2.1 Interpolación IDW (Inverse Distance Weighted)

La interpolación IDW se basa en calcular el valor interpolado a partir sus valores vecinos asignándoles una ponderación en función inversa de la distancia elevada a un exponente (Watson & Philip, 1985). Es posible restringir el número de vecinos en función de un radio o de un número máximo de vecinos a considerar.

Se han evaluado distintos valores y finalmente se ha utilizado un exponente de 2 y un radio variable que considera 12 vecinos. El resultado presenta artefactos en zonas con poca densidad de puntos y al mismo tiempo pierde precisión en las zonas donde la densidad es mayor (Figura 9).

Figura 9: Interpolación IDW con los valores considerados óptimos y evaluación del error



4.2.2 Interpolación Spline

El algoritmo de interpolación utilizando la Spline impone las dos siguientes condiciones (Franke, 1982):

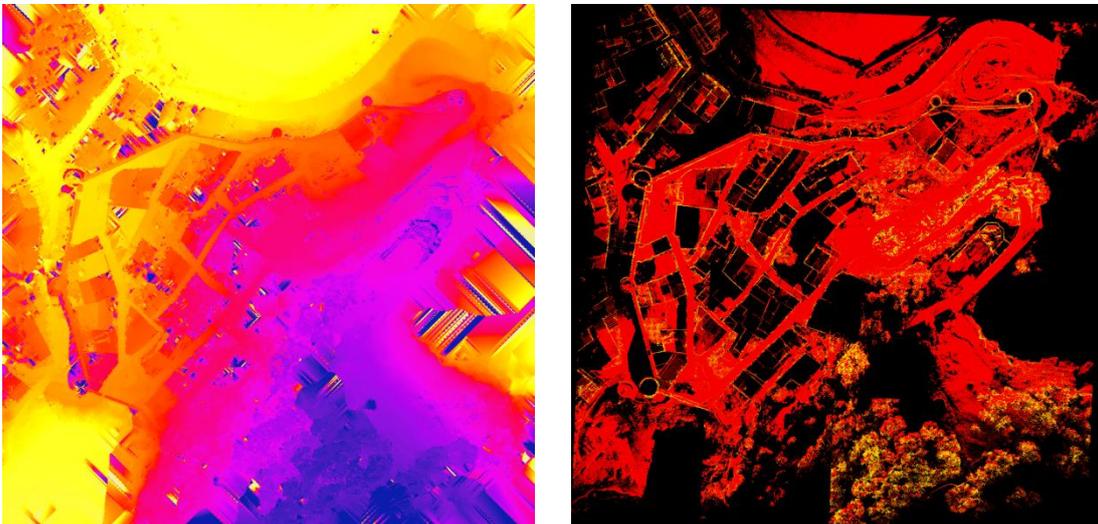
- La superficie interpolada debe pasar exactamente por los puntos de los que se tienen datos.
- La superficie obtenida debe tener la mínima curvatura.

El resultado obtenido es una superficie con cambios suaves en el caso que se utilice la opción *regularized* y con cambios más abruptos en el caso de la opción *tension*.

Se han evaluado distintas opciones y finalmente se ha optado por la opción *regularized* puesto que se obtienen mejores resultados para el conjunto de datos estudiado.

El algoritmo genera muchos artefactos en las mayores zonas sin datos en forma de patrón cruzado en diagonal y mayores errores que el IDW (Figura 10).

Figura 10: Interpolación Spline con los valores considerados óptimos y evaluación del error

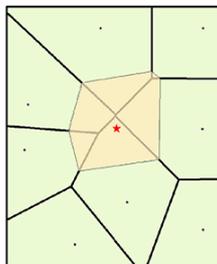


4.2.3 Interpolación Natural Neighbor

El algoritmo *Natural Neighbor* es parecido al IDW en el sentido que pondera a los valores vecinos en función de su posición respecto al *pixel* evaluado.

La metodología que utiliza consiste en primer lugar en generar un diagrama de Voronoi (Figura 11) de los puntos a interpolar (puntos negros) grafiado como los polígonos de color verde. En segundo lugar se genera un segundo diagrama de Voronoi (en naranja) incluyendo el punto a interpolar (estrella roja) y asigna los pesos en función del área de superposición con el diagrama anterior (Sibson, 1981).

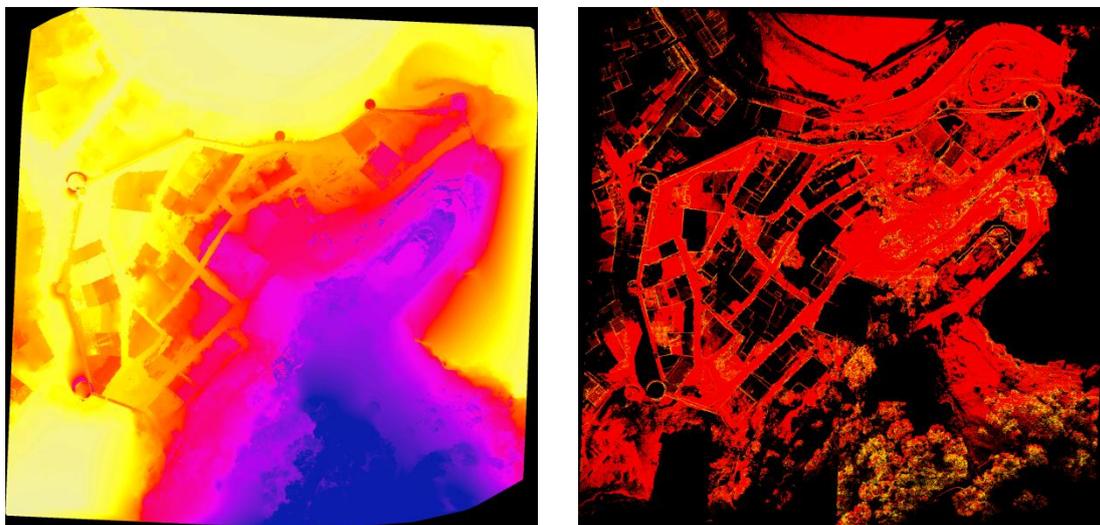
Figura 11: Esquema de asignación de valores del algoritmo Natural Neighbors (fuente: ESRI)



El resultado del algoritmo es un *raster* cuyos límites son el *Convex Hull* del conjunto de puntos de partida en proyección horizontal.

El algoritmo obtiene relativamente buenos resultados tanto para zonas con pocos puntos como para zonas con mayor densidad sin introducir demasiados artefactos ni errores (Figura 12).

Figura 12: Interpolación Natural Neighbor y evaluación del error

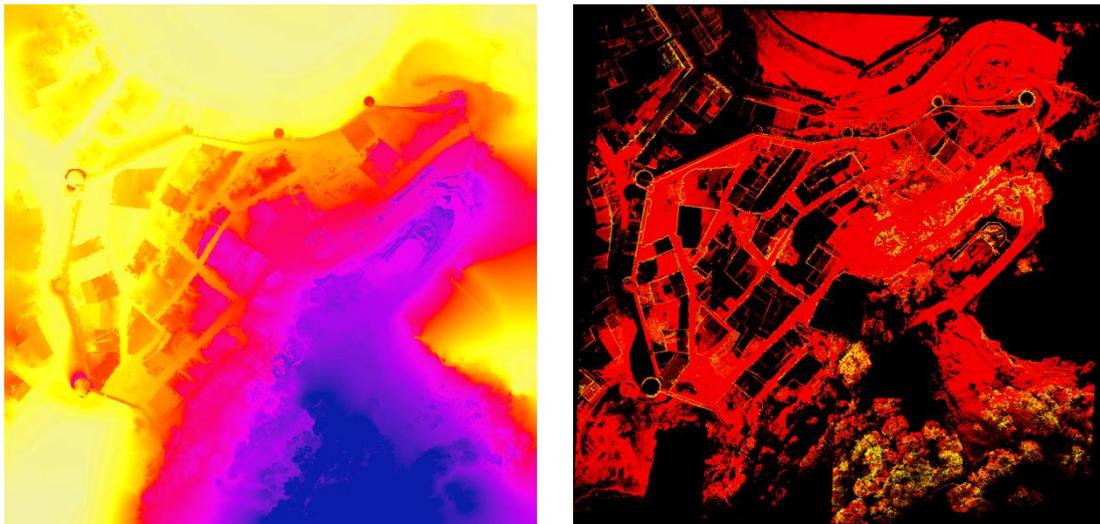


4.2.4 Interpolación Topo to Raster

El algoritmo *Topo to Raster* interpola los valores de elevación y genera una estructura de drenaje conectada evitando la creación de puntos bajos que no se acostumbran a dar en las topografías naturales (en nuestro caso no se han considerado). El algoritmo está concebido principalmente para obtener superficies topográficas hidrológicamente correctas, en especial a partir de curvas de nivel pero no exclusivamente, por lo que también acepta entidades de tipo punto. La metodología está basada en el programa ANUDEM desarrollado en la *Australian National University* (Hutchinson, 1989).

Los resultados son parecidos a los del algoritmo *Natural Neighbor* pero debido a las hipótesis de partida que utiliza el resultado es menos fiable puesto que los puntos iniciales no representan una topografía correcta sino con errores y se introducen algunas distorsiones (Figura 13).

Figura 13: Interpolación Topo to Raster y evaluación del error

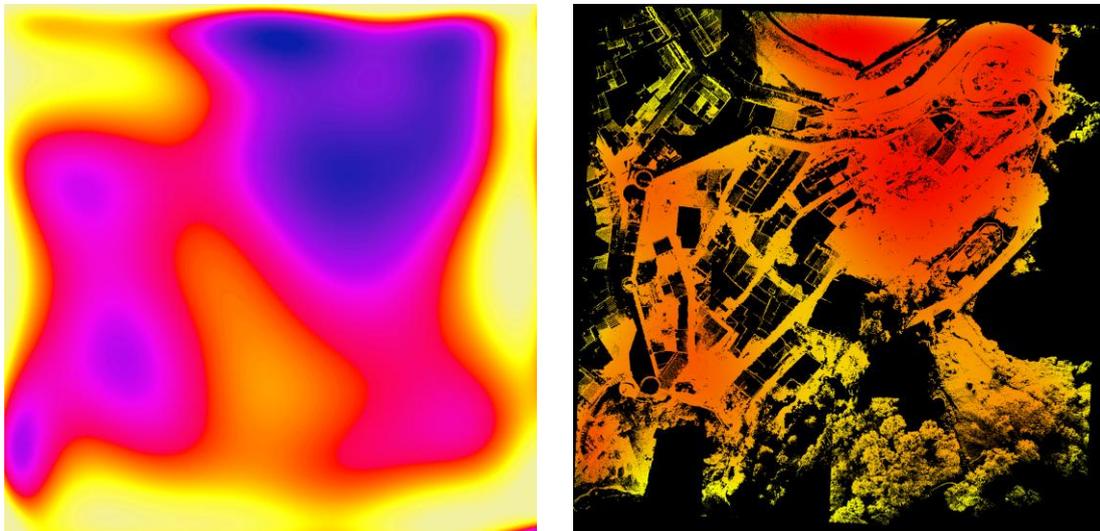


4.2.5 Interpolación Trend

El algoritmo *Trend* consiste en encontrar el polinomio de grado n^{10} que más se aproxima a los puntos dados. Se trata de un interpolador inexacto, aunque como contrapartida nos da una medida del error RMS (*Root Mean Square*).

Se ha utilizado el programa IDRISI para realizar este tipo de interpolación con un exponente de 9 (Figura 14). Al tratarse de un interpolador para valores que varían de manera continua, los errores presentes en la muestra introducen distorsiones que desaconsejan su uso.

Figura 14: Interpolación Trend de exponente 9 en IDRISI y evaluación del error



¹⁰ ArcGIS permite polinomios de hasta grado 12 y IDRISI polinomios de hasta grado 9

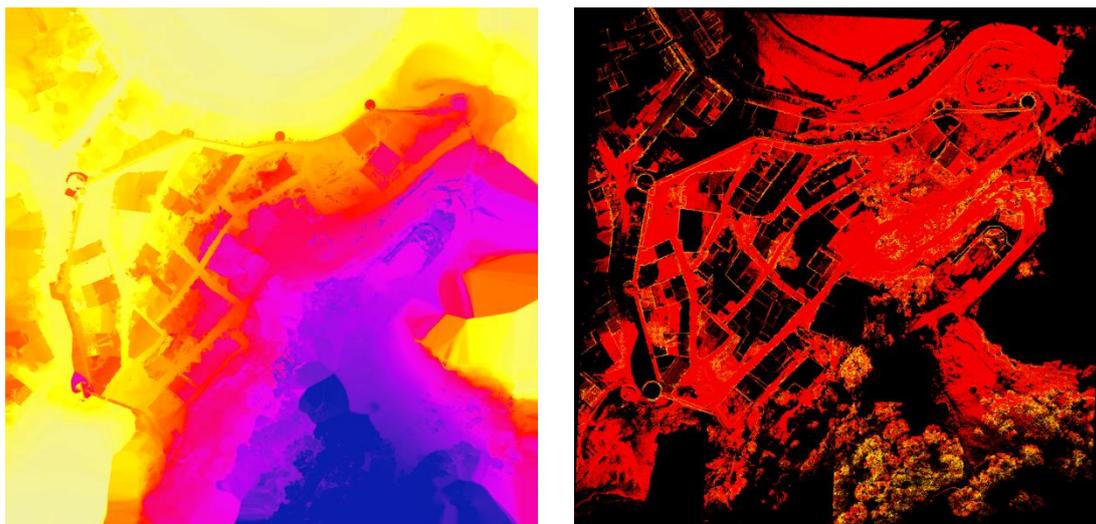
4.2.6 Interpolación Kriging

El método de interpolación Kriging es, a diferencia de los anteriormente presentados, un método geoestadístico. El *raster* generado es la estimación de la superficie a partir de un conjunto disperso de puntos (Oliver, 1990).

Es el método que ha requerido más tiempo de proceso de los interpoladores evaluados, necesitando 57 horas para ser calculado en un *Intel Xeon 5150* operando a una velocidad de 2,66MHz. Alternativamente se puede utilizar el software *IDRISI Taiga*¹¹ para calcular la interpolación mediante el algoritmo *Kriging Local Linear Model Prediction* en cuyo caso el cálculo se realiza en la misma máquina en menos de 6 horas.

El hecho que el método asuma que la variación de los datos (en este caso las coordenadas Z) es estadísticamente homogénea en toda la superficie estudiada provoca que aparezcan problemas en la interpolación debido a que los errores del escáner laser introducen discontinuidades importantes en la cota de los puntos y por lo tanto esta información no está necesariamente correlada espacialmente. Este problema se manifiesta en la muestra en forma de tramado de líneas en las zonas sin datos (Figura 15) que es más aparente si representamos la varianza en cada píxel (Figura 16).

Figura 15: Kriging y evaluación del error



¹¹ El motor geoestadístico de IDRISI está basado en el software libre gstat

Figura 16: Representación de la varianza de la interpolación Kriging



4.3 Conversión a entidad tipo TIN

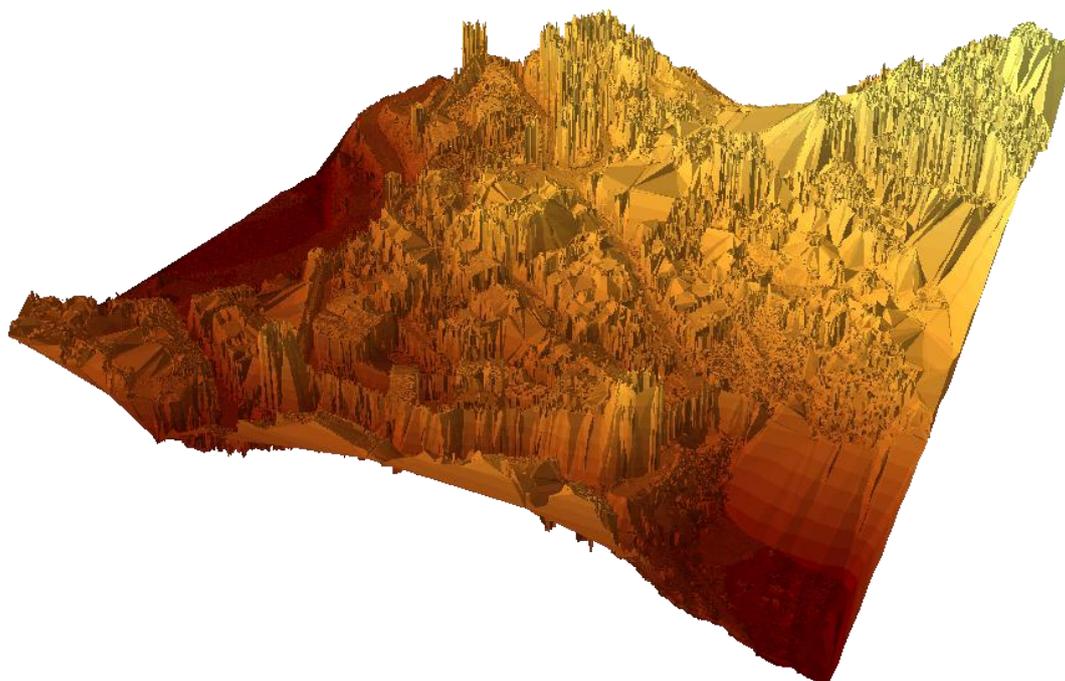
La información de los puntos del LTS también se ha estructurado en un TIN (Triangular Irregular Network).

Los TIN son una forma de almacenar información topográfica de forma vectorial, a partir de la triangulación de los puntos que representan las cotas altimétricas. En un TIN, estos puntos se convierten en vértices de triángulos, los lados de los cuales coinciden con líneas que unen pares de puntos, creando una red. Para la formación de los triángulos se utiliza la triangulación de Delaunay, que maximiza los ángulos de los triángulos generados y por lo tanto evita en lo posible la generación de triángulos excesivamente alargados (Duckham & Worboys, 2004).

El resultado es una figura tridimensional que representa el terreno mediante triángulos, cuya proyección en planta es el *convex hull* de los puntos a partir de los cuales se ha generado el TIN.

Para modelar el terreno en *ArcGIS* se ha optado por utilizar la entidad denominada *Terrain* que consiste en un conjunto de TINs donde la geometría aumenta o disminuye su grado de detalle (numero de triángulos) en función de la resolución a la que se está mostrando el terreno la entidad (Figura 17).

Figura 17: TIN generado a partir de la nube de puntos del LTS

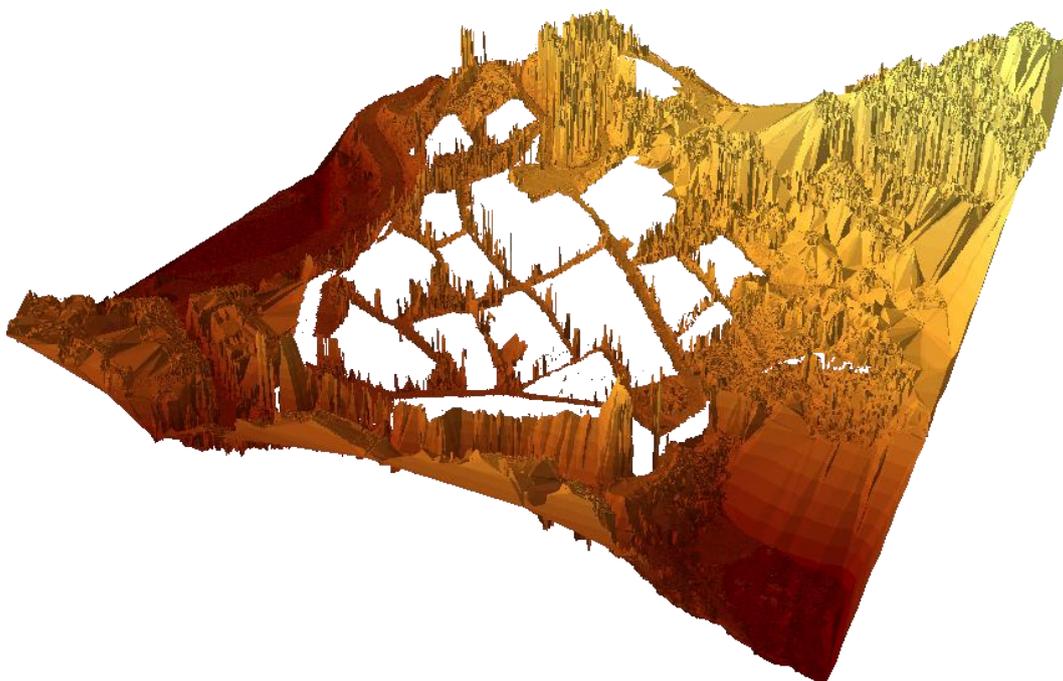


Se han creado TINs para las resoluciones 1:1000, 1:2000, 1:5000 y 1:10.000 para facilitar la visualización a distintas escalas.

Se ha tenido que calcular la distancia media entre puntos, que es desconocida. Para averiguarla, se ha utilizado la herramienta *3D Analyst Tools > Conversion > From Feature Class > Feature Class Z to ASCII* y se ha creado un fichero de de texto con la información de los puntos en formato ASCII (formato *GENERATE*). A partir de este archivo, con la orden *3D Analyst Tools > Conversion > From File > Point File Information* se ha obtenido una entidad *shape* con la información de la distancia media entre puntos, que ha resultado de 0,16 metros entre un total de 1.681.613 puntos.

Una vez generado el TIN, se han incorporado como *hard erase* los polígonos correspondientes a las manzanas debido a que los puntos capturados por el LTS que están dentro de su perímetro no nos dan ninguna información topográfica. El resultado (Figura 18) permite apreciar que la topografía obtenida contiene importantes errores y que por lo tanto no es apta para el cálculo de pendientes de las rutas.

Figura 18: TIN modelando como vacíos las zonas correspondientes a las manzanas



Con la visualización del TIN se hace patente que es necesario filtrar la información de la nube de puntos para excluir aquellos que no representan una muestra la topografía a estudiar (Kersting & Kersting, 2005).

Se han clasificado los triángulos según su altura (Figura 19), la dirección de su normal (Figura 20) y pendiente máxima (Figura 21) para detectar zonas donde existen errores de lectura que impiden evaluar la topografía sin introducir distorsiones.

Figura 19: Triángulos del TIN clasificados según su altura (con sombreado)

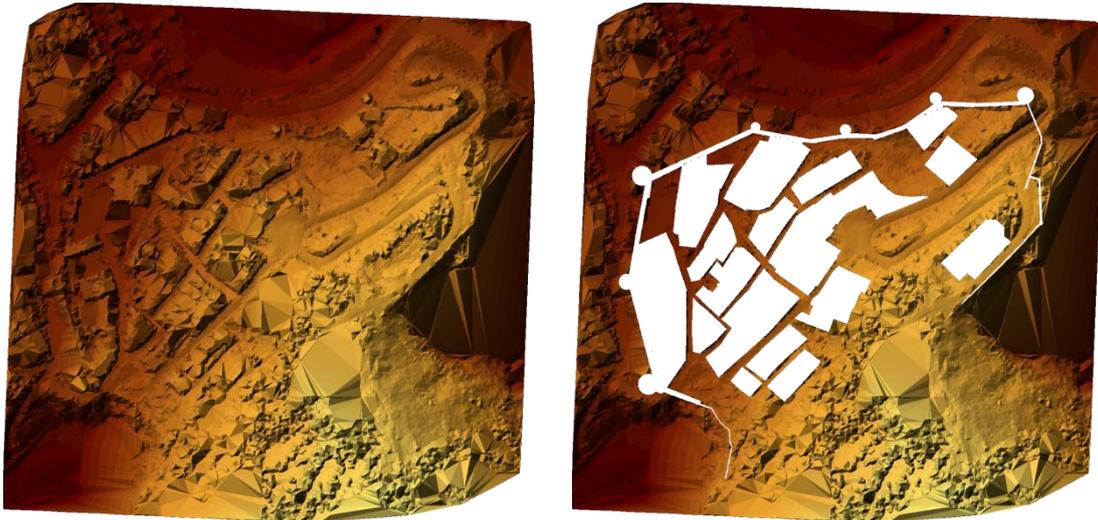


Figura 20: Triángulos del TIN clasificados según la dirección de su normal

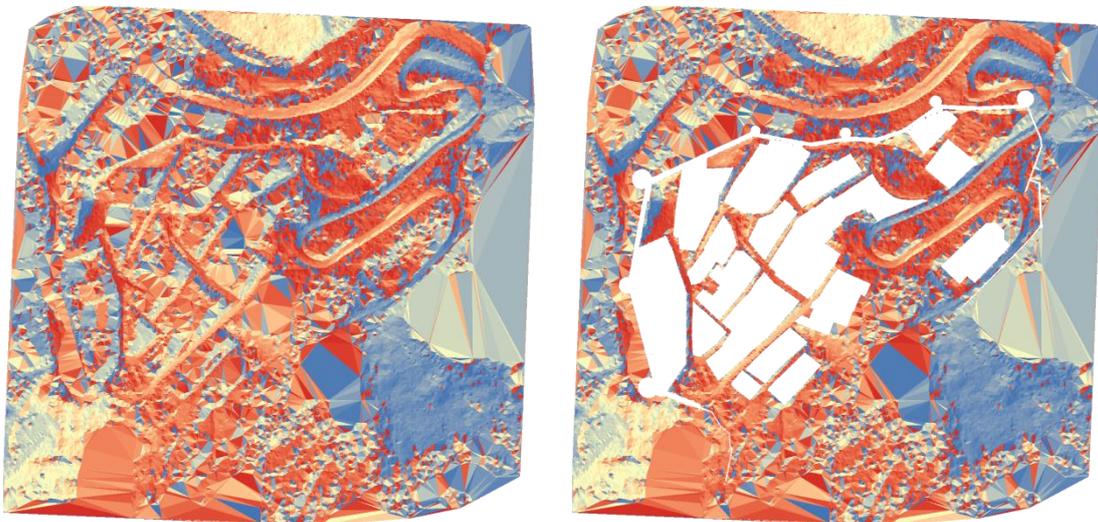
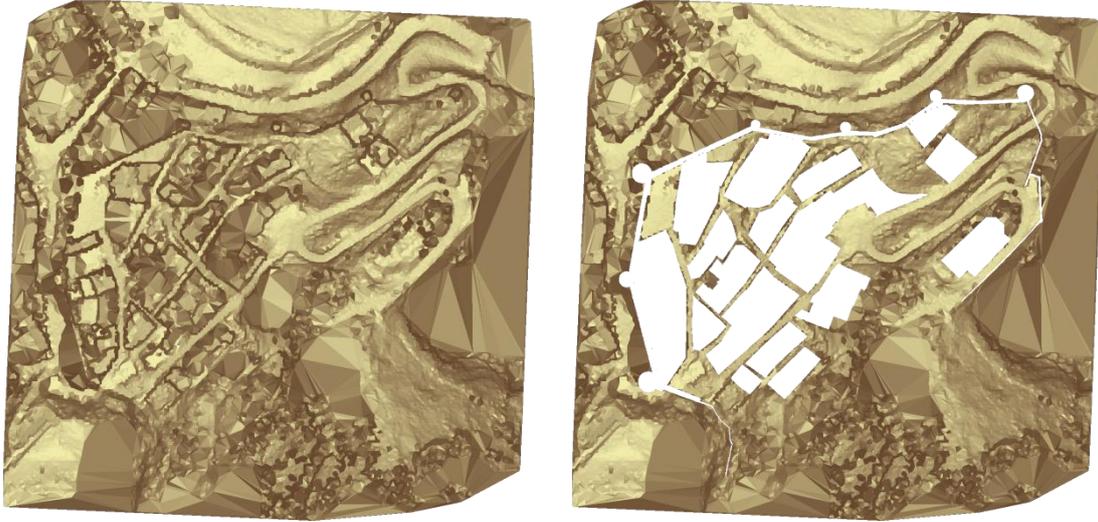


Figura 21: Triángulos del TIN clasificados según su pendiente máxima



5 Obtención de la topografía

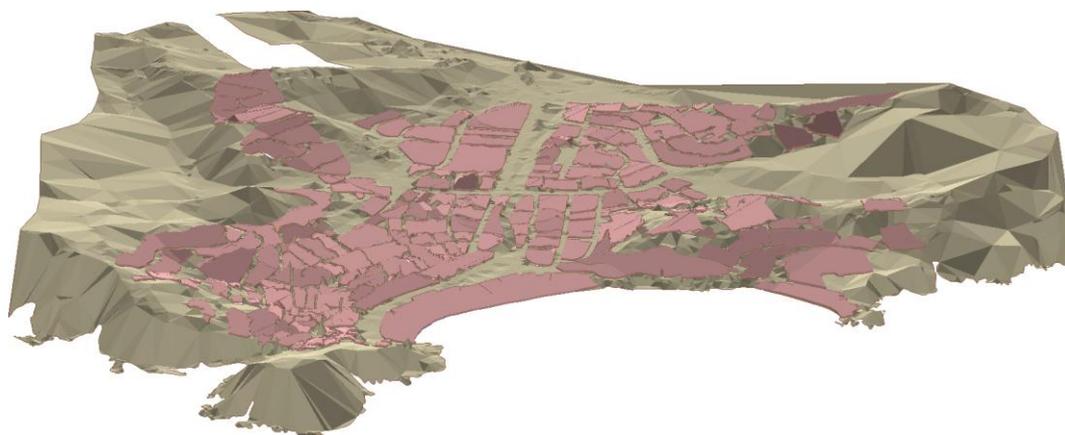
5.1 Viabilidad de la utilización de la información del ICC

Se ha contemplado la utilización de los puntos altimétricos del ICC para el cálculo de pendientes.

Se ha seguido el mismo procedimiento descrito anteriormente para obtener la topografía del ámbito (Figura 22), utilizando la geometría de las manzanas (que previamente han tenido que convertirse a entidades 2D¹²) como *hard erase*.

Para ello se ha tenido que calcular la distancia media entre puntos, que es desconocida. Para averiguarla, se ha utilizado la herramienta *3D Analyst Tools > Conversion > From Feature Class > Feature Class Z to ASCII* y se ha creado un fichero de de texto con la información de los puntos en formato ASCII (formato *GENERATE*). A partir de este archivo, con la orden *3D Analyst Tools > Conversion > From File > Point File Information* se ha obtenido una entidad *shape* con la información de la distancia media entre puntos, que ha resultado de 16,73 metros entre un total de 15.578 puntos.

Figura 22: TIN obtenido a partir de la información altimétrica del ICC



Adicionalmente, se ha hecho una interpolación Kriging y mediante el estudio de la varianza del resultado (Figura 23) se ha constatado que estos puntos no aportan una información suficientemente detallada por estar los puntos demasiado separados y

¹² Véase <http://resources.arcgis.com/content/kbase?fa=articleShow&d=30455>

debido a que algunos de ellos representan cotas de elementos construidos, lo que impide su utilización para este estudio (Figura 24).

Figura 23: Interpolación Kriging y Varianza de los puntos del ICC del ámbito

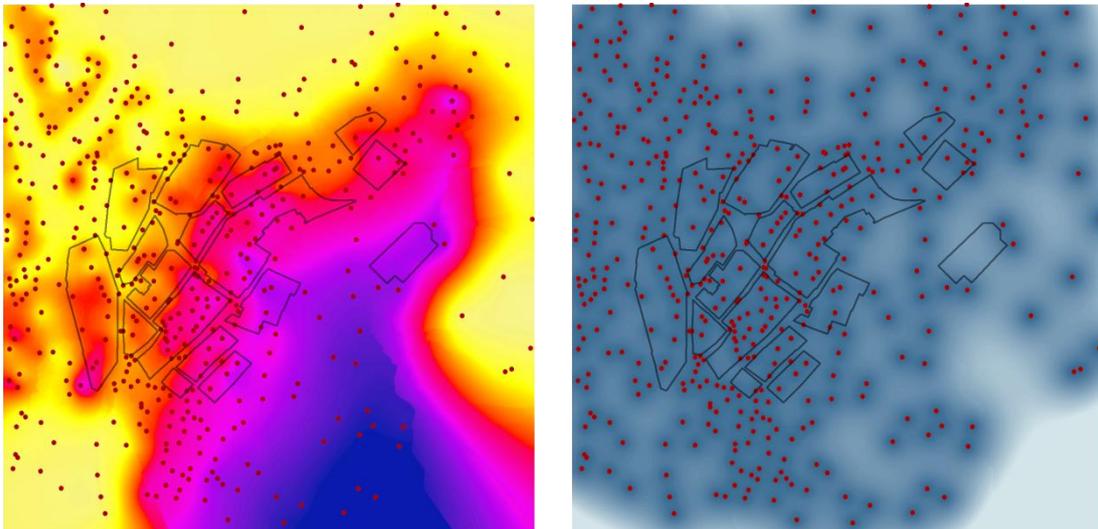
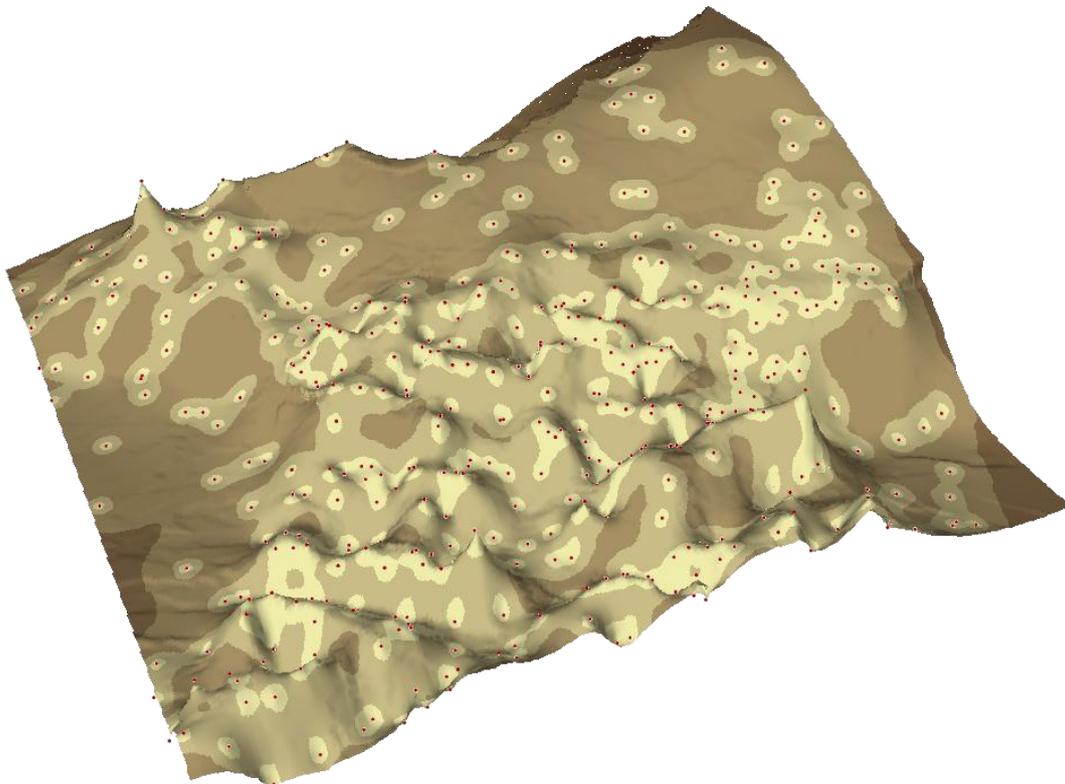


Figura 24: Varianza representada sobre el MDT generado a partir de los puntos del ICC



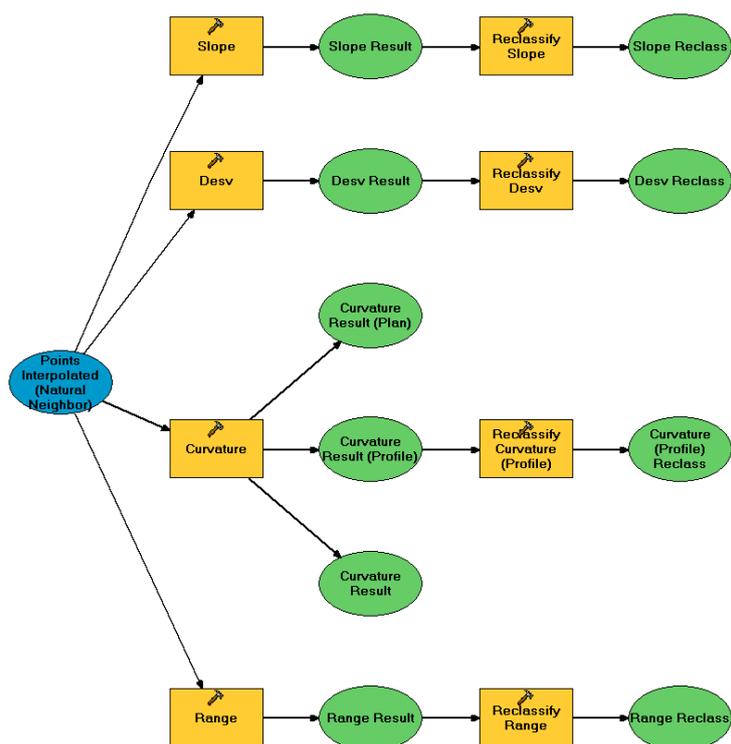
5.2 Obtención de muestras representativas

Para poder evaluar la pendiente del núcleo urbano es necesario disponer de una superficie topográfica que represente las calles por donde discurrirán los itinerarios evaluados.

La metodología consiste en generar una nueva topografía a partir de unos puntos registrados por el LTS que, mediante técnicas de clasificación, se han identificado como representativos de la topografía con un alto grado de confianza. Estos píxeles serán llamados “candidatos”.

Para la clasificación de los píxeles se ha desarrollado módulo en *Model Builder* de *ArcGIS*, el cual permite detectar posibles datos anómalos con cuatro criterios diferentes (Figura 25).

Figura 25: Diagrama de bloques del módulo de identificación de candidatos¹³

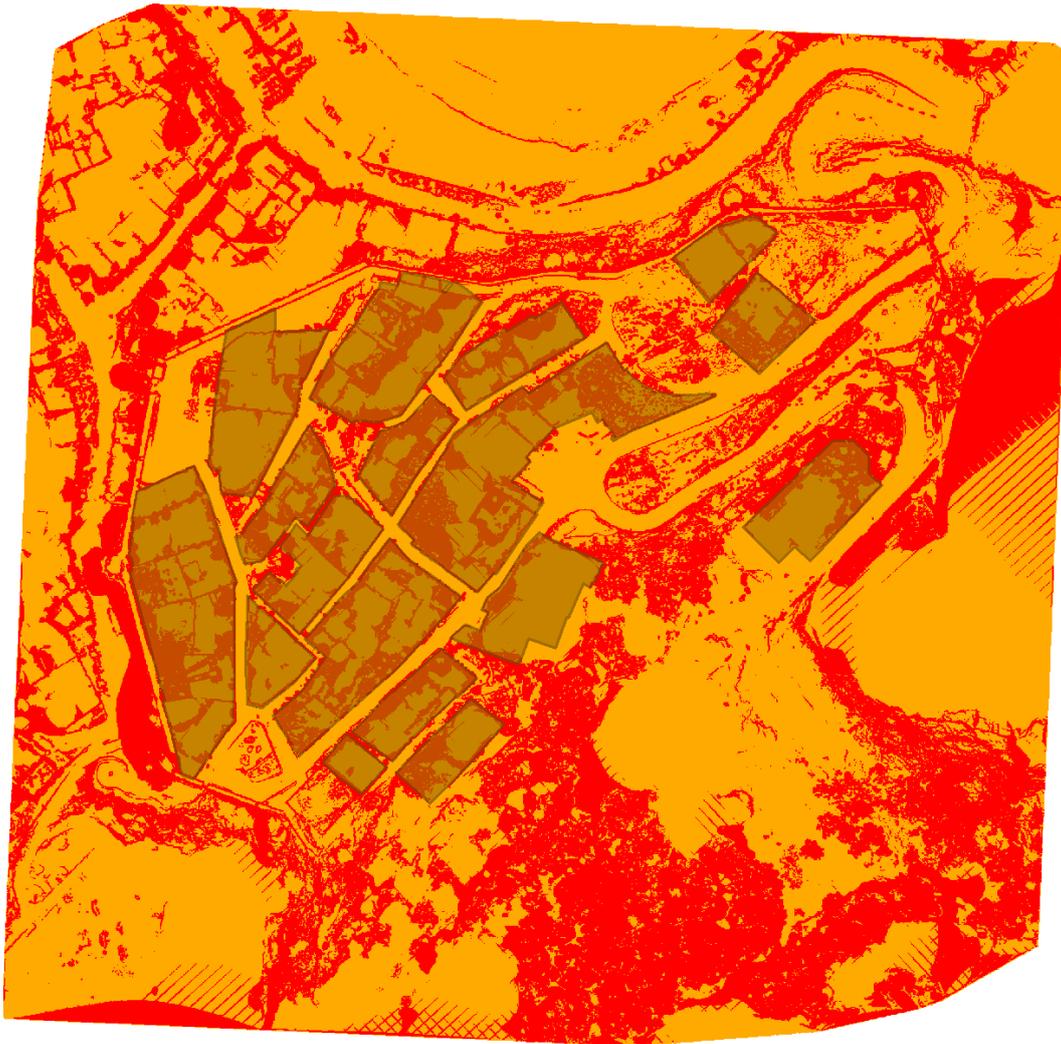


¹³ Véase código *VisualBasic* en apartado 12.1 (página 139)

5.2.1 Clasificación según la desviación estándar

El primer método consiste en evaluar la desviación estándar de cada uno de los vecinos de cada píxel para, posteriormente, reclasificar los resultados en dos grupos (Figura 26): candidatos (en naranja) y descartados (en rojo).

Figura 26: Clasificación de candidatos según la desviación estándar

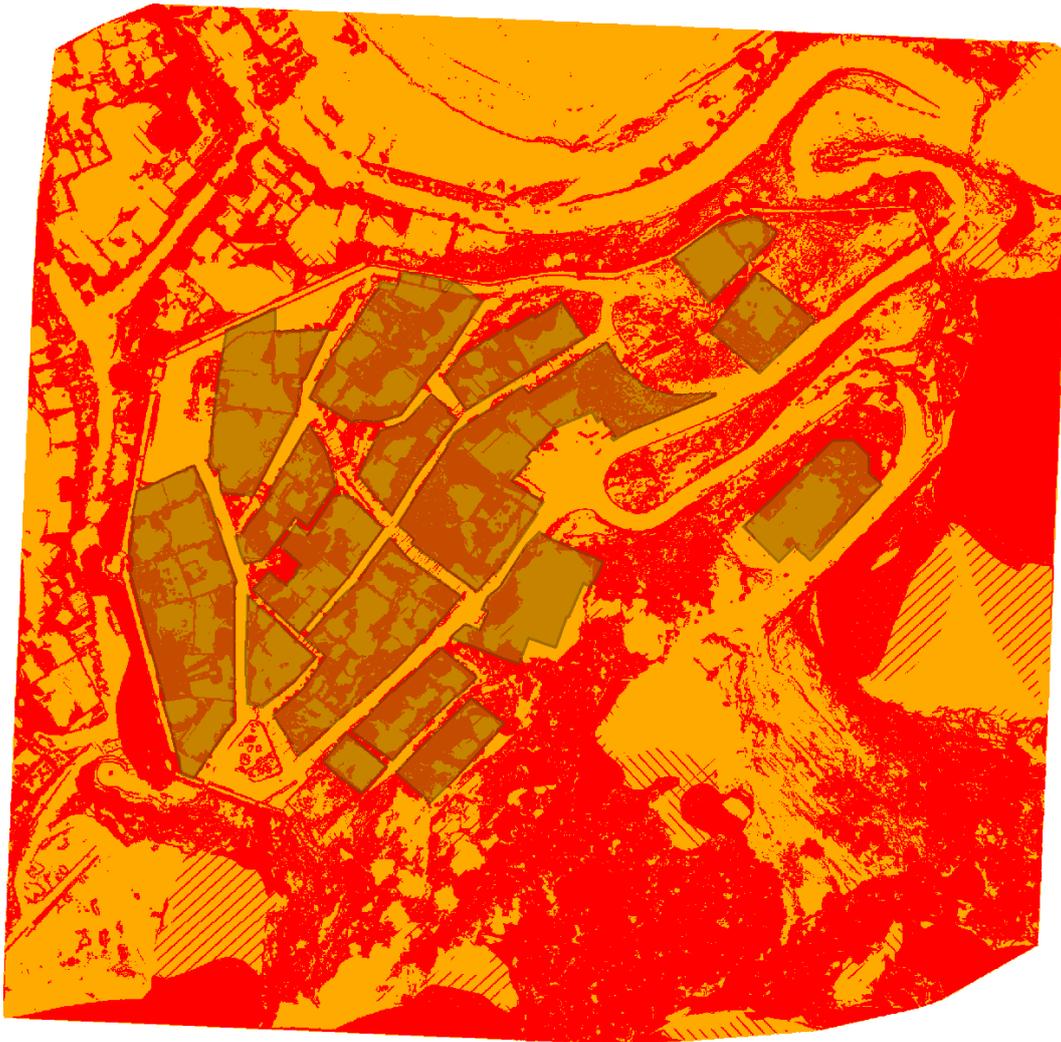


Se utiliza la herramienta *Spatial Analyst Tools > Neighborhood > Focal Statistics* y se calcula la desviación estándar (*STD*) en una ventana rectangular de *3x3 pixels*. El resultado es clasificado con la herramienta *Spatial Analyst Tools > Reclass > Reclassify* de manera que los valores menores o iguales a 0,1 se les asigna el valor de 1 (candidato) y los valores superiores a 0,1 se les asigna el valor de 2 (descartado). Para representar esta clasificación se hace un mapa temático con estos valores.

5.2.2 Clasificación según el rango

El segundo método consiste en evaluar el rango (diferencia entre valor máximo y mínimo) de cada uno los vecinos de cada píxel para, posteriormente, reclasificar los resultados en dos grupos (Figura 27): candidatos (en naranja) y descartados (en rojo).

Figura 27: Clasificación de candidatos según el rango



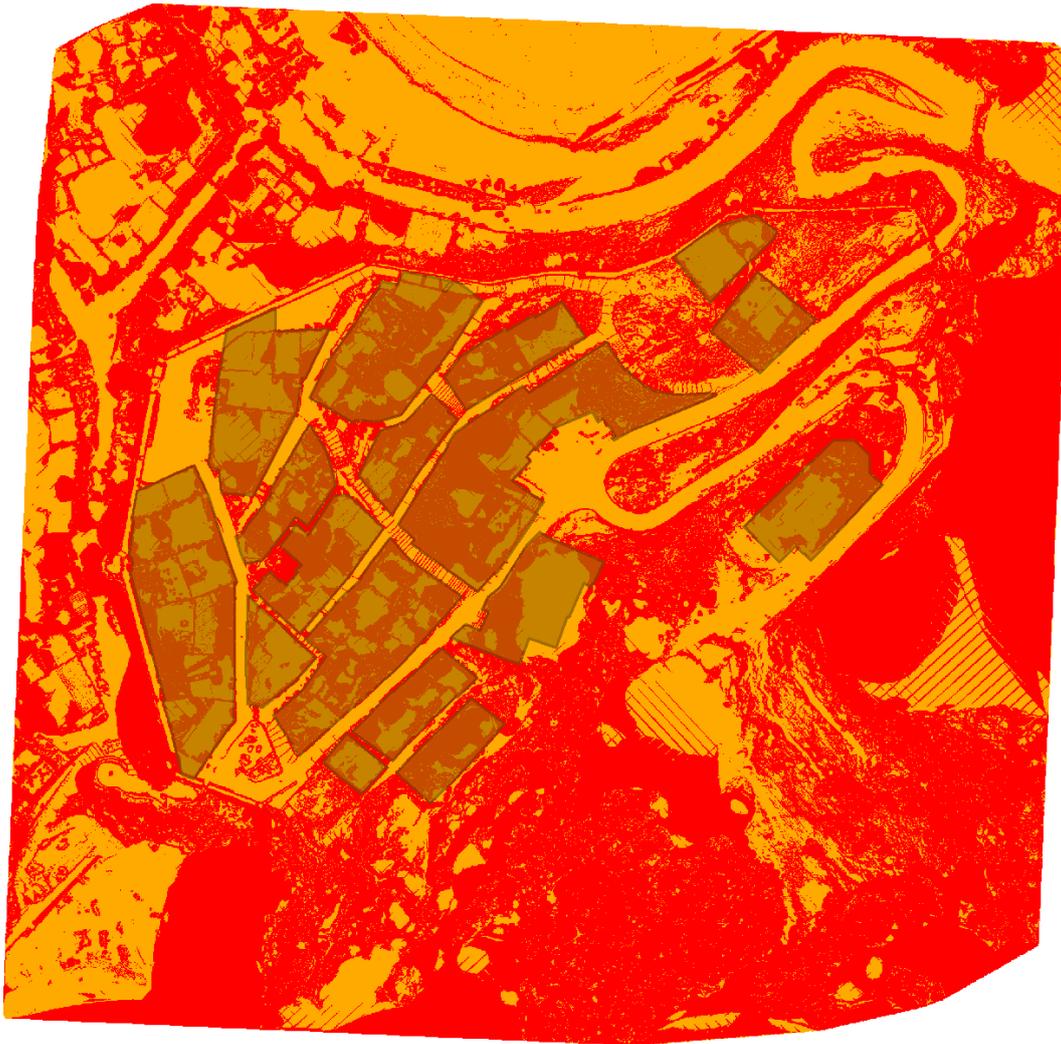
Se utiliza la herramienta *Spatial Analyst Tools > Neighborhood > Focal Statistics* y se calcula el rango (*RANGE*) en una ventana rectangular de 3x3 píxeles. El resultado es clasificado con la herramienta *Spatial Analyst Tools > Reclass > Reclassify* de manera que los valores menores o iguales a 0,2 se les asigna el valor de 1 (candidato) y los valores superiores a 0,2 se les asigna el valor de 2 (descartado). Para representar esta clasificación se hace un mapa temático con estos valores.

Con esta operación que se obtienen los puntos que están 20 cm por encima de sus ocho vecinos, hecho que indica que se produce un cambio brusco de altura. Teniendo en cuenta que los píxeles vecinos están situados a 10 cm del *pixel* evaluado y que la diferencia es dos veces este valor, como consecuencia este rango representa una pendiente del 200% respecto los cuatro puntos situados ortogonalmente adyacentes y de alrededor del 140% para los cuatro puntos situados en las esquinas.

5.2.3 Clasificación según la pendiente

El tercer método evaluado consiste en el cálculo de la pendiente¹⁴ (primera derivada) en cada *pixel* para, posteriormente, reclasificar los resultados en dos grupos (Figura 28): candidatos (en naranja) y descartados (en rojo).

Figura 28: Clasificación de candidatos según la pendiente



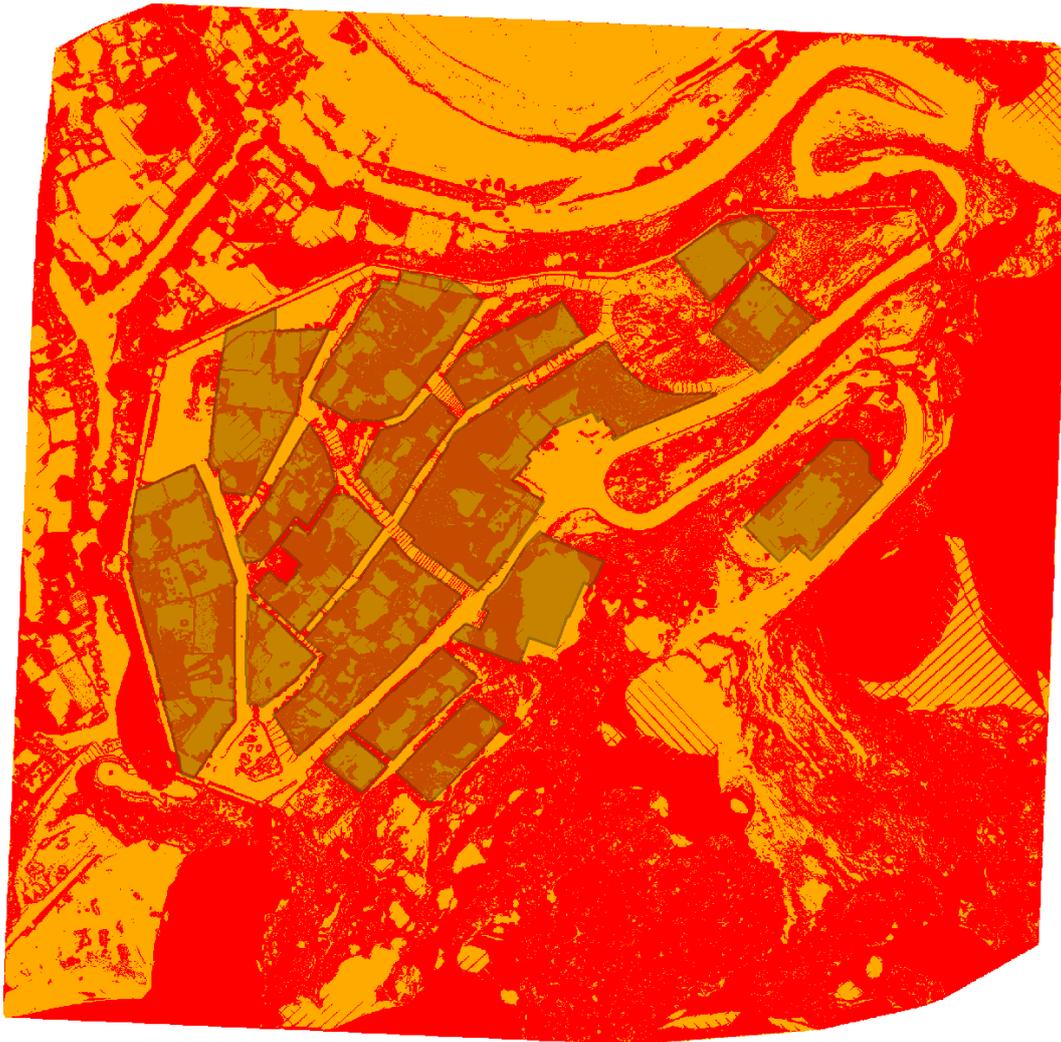
Se utiliza la herramienta *Spatial Analyst Tools > Surface > Slope* y se calcula la pendiente (*PERCENT_RISE*). El resultado es clasificado con la herramienta *Spatial Analyst Tools > Reclass > Reclassify* de manera que los valores menores o iguales a 50% se les asigna el valor de 1 (candidato) y los valores superiores a 50% se les asigna el valor de 2 (descartado). Para representar esta clasificación se hace un mapa temático con estos valores.

¹⁴ Pendiente = Δ distancia vertical / Δ distancia horizontal x 100

5.2.4 Clasificación según la curvatura

El cuarto método evaluado consiste en el cálculo de la curvatura o segunda derivada (Figura 30) en cada *pixel* para, posteriormente, reclasificar los resultados en dos grupos (Figura 29): candidatos (en naranja) y descartados (en rojo).

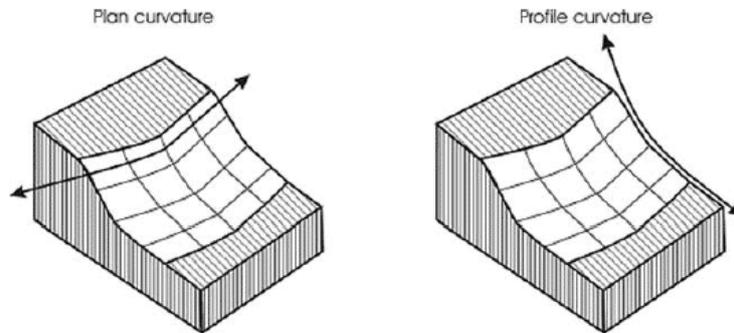
Figura 29: Clasificación de candidatos según la curvatura (perfil)



Se utiliza la herramienta *Spatial Analyst Tools > Surface > Curvature* para calcular la curvatura. Se generan tres *rasters*: *curvature*, *profile curvature* y *plan curvature*. El resultado de la *profile curvature* es clasificado con la herramienta *Spatial Analyst Tools > Reclass > Reclassify* de manera que los valores menores o iguales a -200 se les asigna el valor de 1 (candidato), los valores superiores o iguales a 200 se les asigna el valor de 1 (candidato) y los valores entre -200 y 200 se les asigna el valor 2

(descartado). Para representar esta clasificación se hace un mapa temático con estos valores.

Figura 30: Curvatura de una superficie en planta y en perfil¹⁵



¹⁵ Véase <http://www.transportscotland.gov.uk/reports/road/j10107-07.htm>

5.2.5 Metodologías adicionales para la identificación de candidatos

Como metodología alternativa se ha ensayado el trabajo directo con la nube de puntos sin optimizar con *GeoMagic*. Para ello se ha exportado la nube de puntos desde *Pointools* a un archivo ASCII que se ha importado en *ArcGIS*.

En primer lugar se ha utilizado la herramienta *3D Analyst Tools > Conversion > From File > Point File Information* y se ha obtenido una entidad *shape* con la información de la distancia media entre puntos, que ha resultado de 0.019 metros entre un total de 119.090.304 puntos. A continuación se ha convertido la información del archivo ASCII a una entidad *MultiPoint* con la orden *3D Analyst Tools > Conversion > From File > ASCII 3D to Feature Class*. Para comprobar los resultados con los obtenidos a través de *GeoMagic*, se ha convertido la información de los puntos a un *raster* de la misma resolución (10 centímetros), muy inferior a la media de los puntos (2 centímetros). La relación entre resoluciones es que la de la nube de puntos es 25 veces superior a la del *raster* (Ecuación 3):

Ecuación 3: Relación entre resoluciones *raster* y LTS

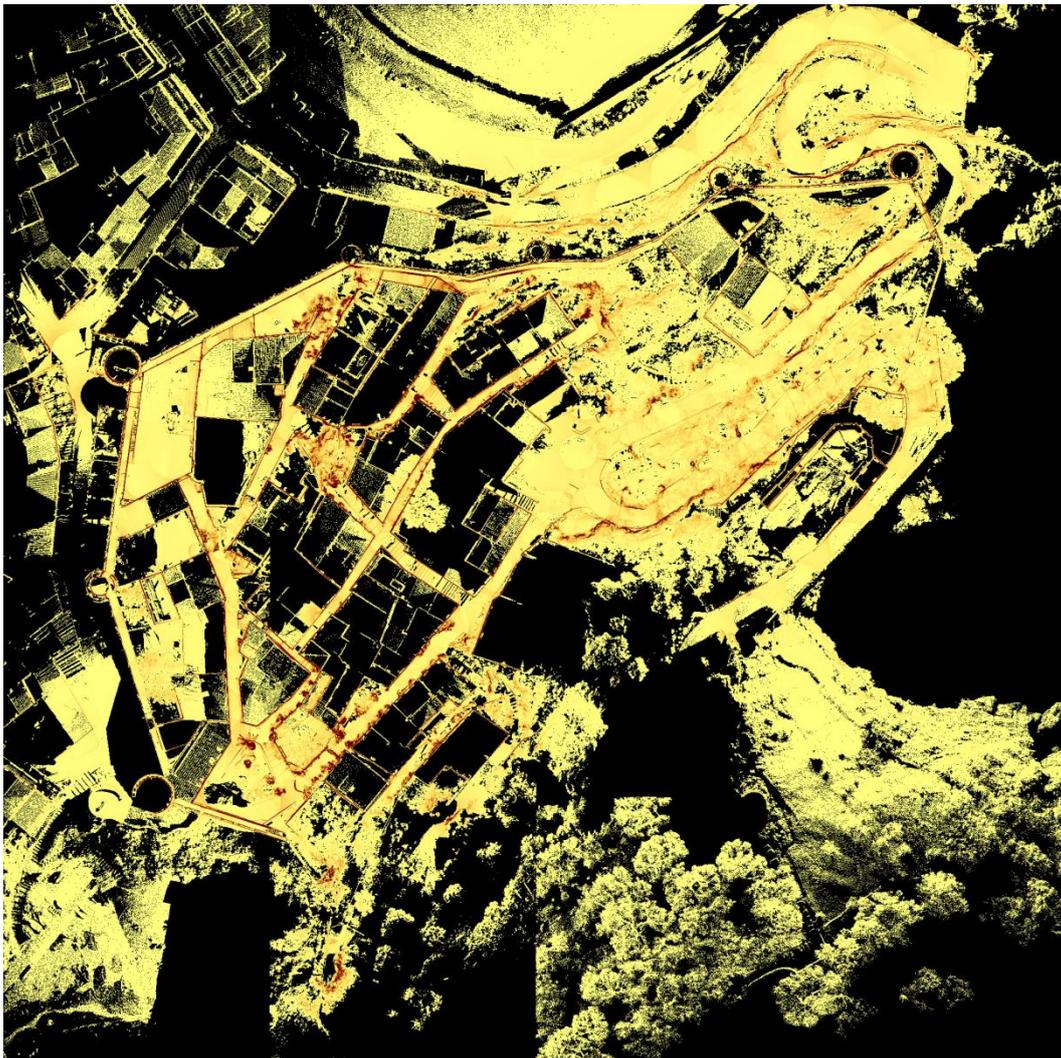
$$\text{Relación entre resoluciones} = \frac{\text{resolución lineal LTS}^2}{\text{resolución lineal raster}^2} = \frac{2^2}{10^2} = \frac{1}{25}$$

Mediante la instrucción *Conversion Tools > To Raster > Point to Raster* se ha convertido la entidad *MultiPoint* a *raster*. Como campo para determinar el valor del *raster* elegimos el de *shape*, con lo cual se asignará la coordenada Z del punto al valor de cada *pixel* en función de la posición del punto correspondiente en planta. Se han utilizado las siguientes opciones para elegir el valor del píxel a partir de los puntos que recaen en él:

- La desviación estándar del conjunto de los valores (*Standard Deviation*)
- El mayor de los valores que aparece (*Maximum*)
- El menor de los valores que aparece (*Minimum*)
- La diferencia de valores entre el valor mayor y el menor (*Range*)
- La el número de lecturas de puntos en cada píxel (*Count*)

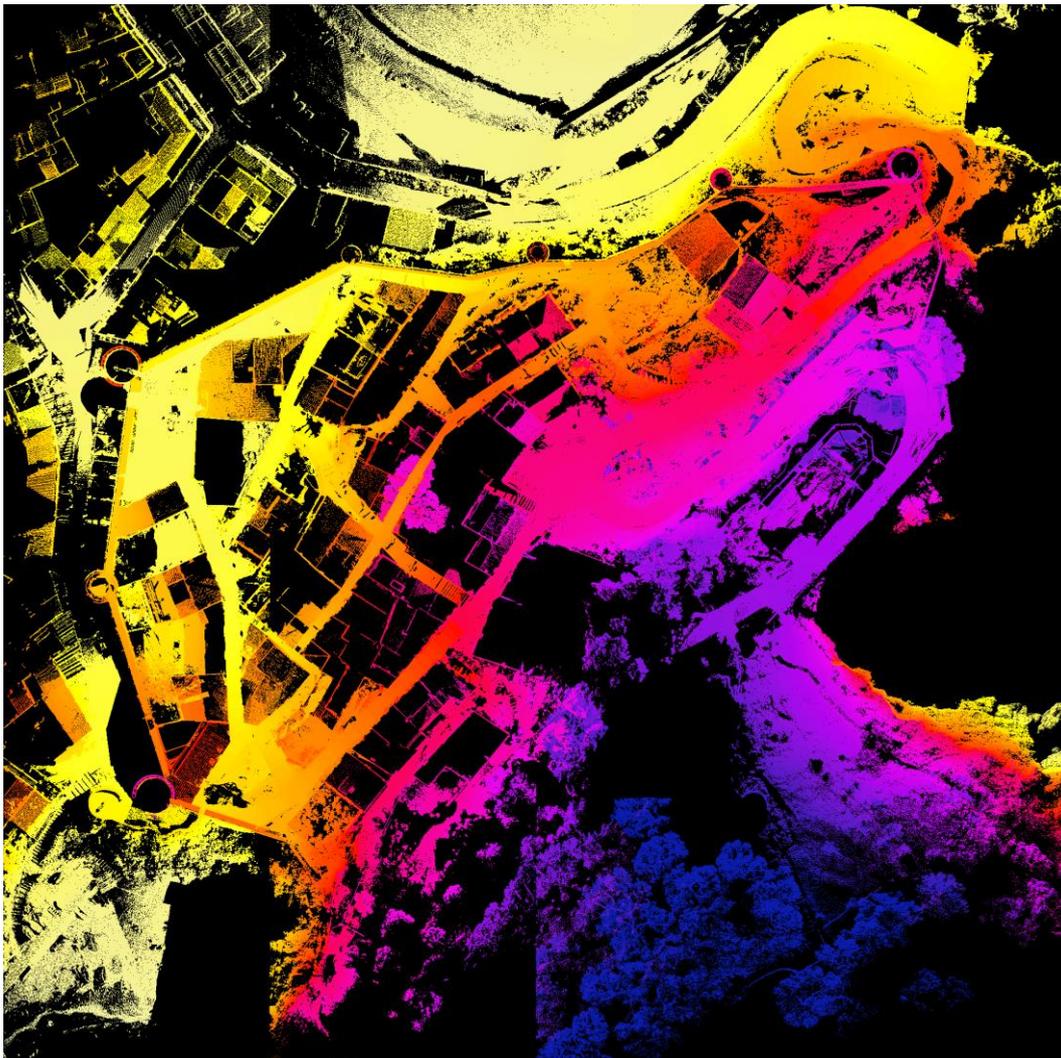
En primer lugar se ha obtenido el número de lecturas por píxel, que equivale al número de lecturas por cada 10 centímetros cuadrados, con lo que se puede apreciar que las lecturas se acumulan en los planos verticales (Figura 31).

Figura 31: Densidad de lecturas por unidad de área



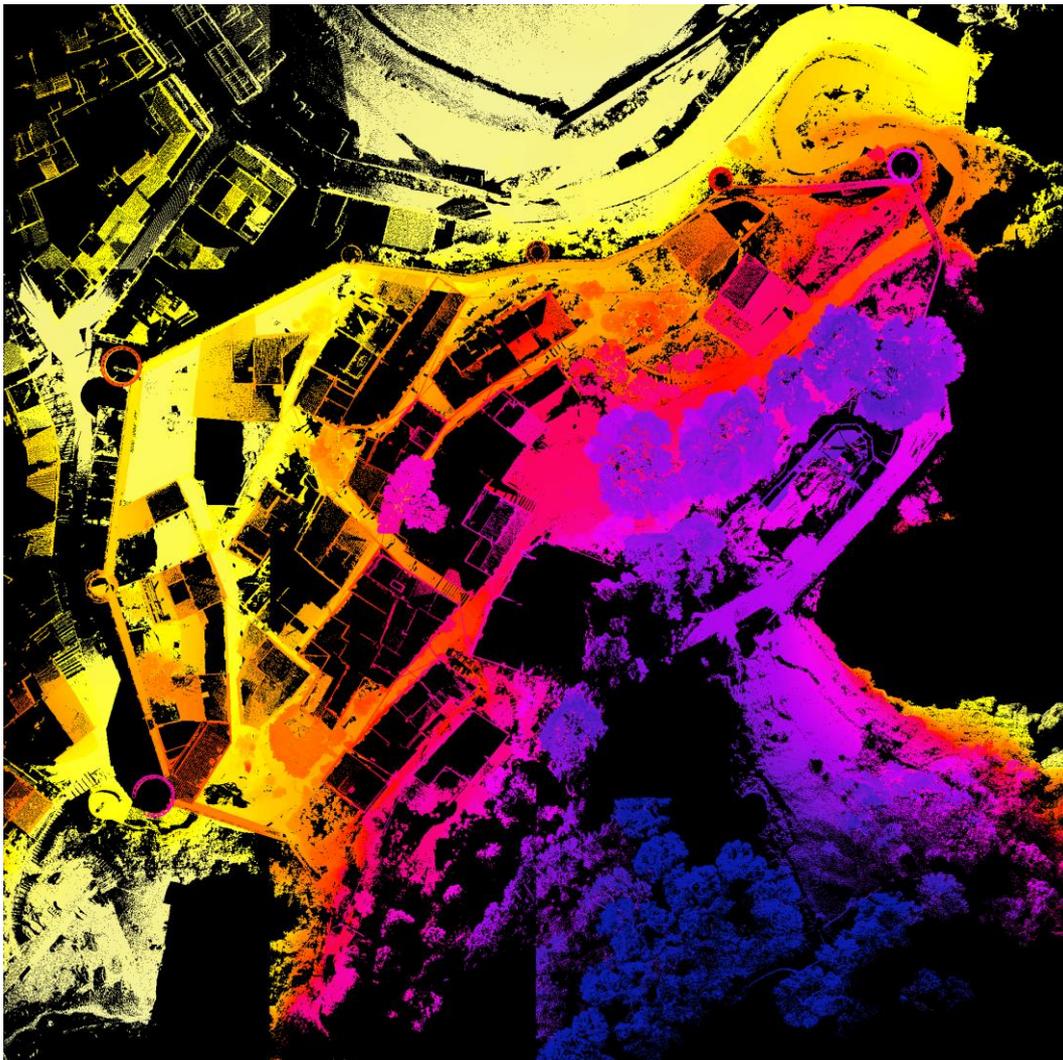
La información del valor máximo y mínimo nos aportan distinta información. El valor mínimo nos permite identificar gran parte de los valores valores correspondientes a la topografía (Figura 32) pero no nos permite distinguirlos de manera categórica.

Figura 32: Valores mínimos para cada píxel del conjunto de la nube de puntos



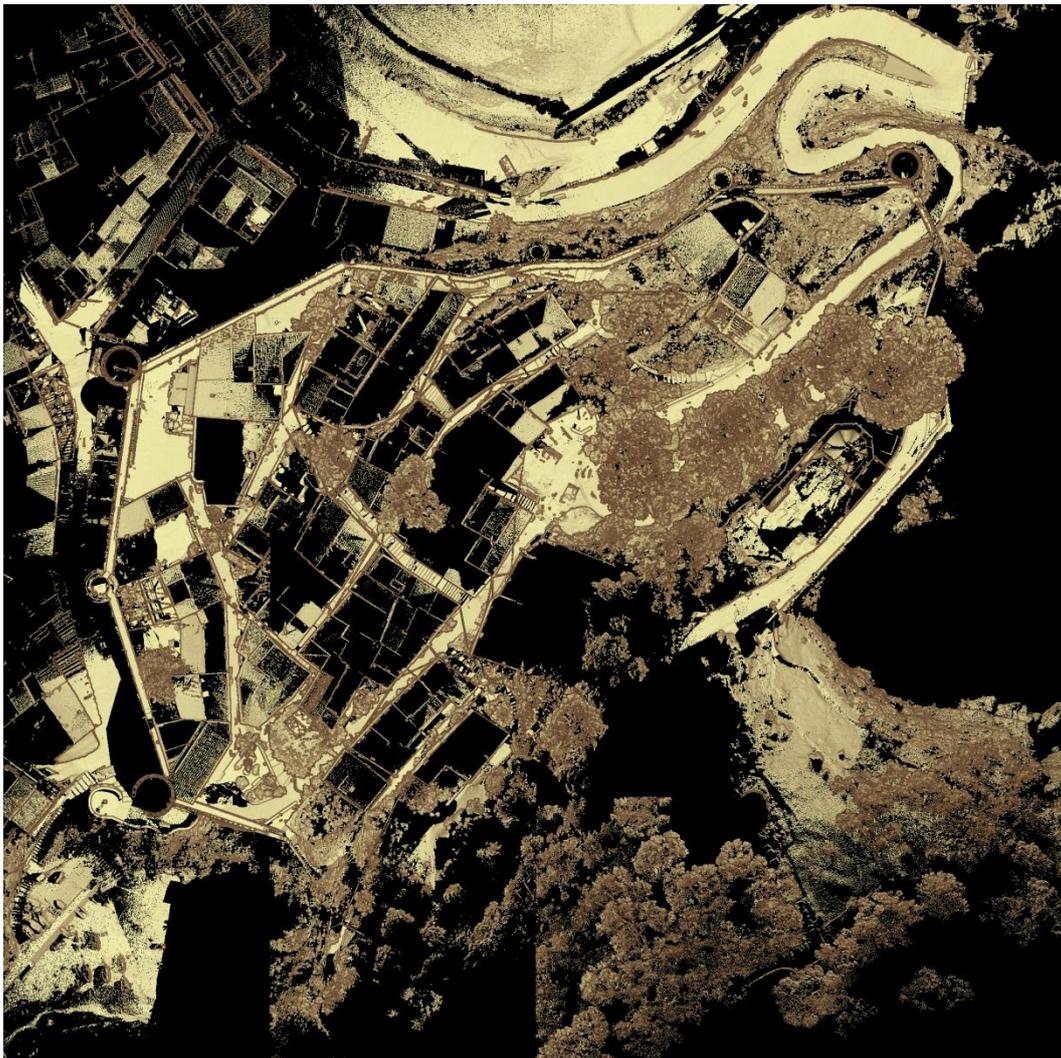
En el caso del valor máximo, nos proporciona una proyección horizontal casi arquitectónica (Figura 33) donde se aprecian, entre otros elementos, las cubiertas, las masas de los árboles, el tendido eléctrico y en algunos casos el mobiliario urbano.

Figura 33: Valores máximos para cada píxel del conjunto de la nube de puntos



Para enfatizar este aspecto de representación arquitectónica, se ha realizado un mapa de pendientes que realza el detalle de la imagen identificando los bordes de la misma manera como se ha hecho tradicionalmente en la geometría descriptiva (Figura 34).

Figura 34: Plano de pendientes de los valores máximos del conjunto de la nube de puntos



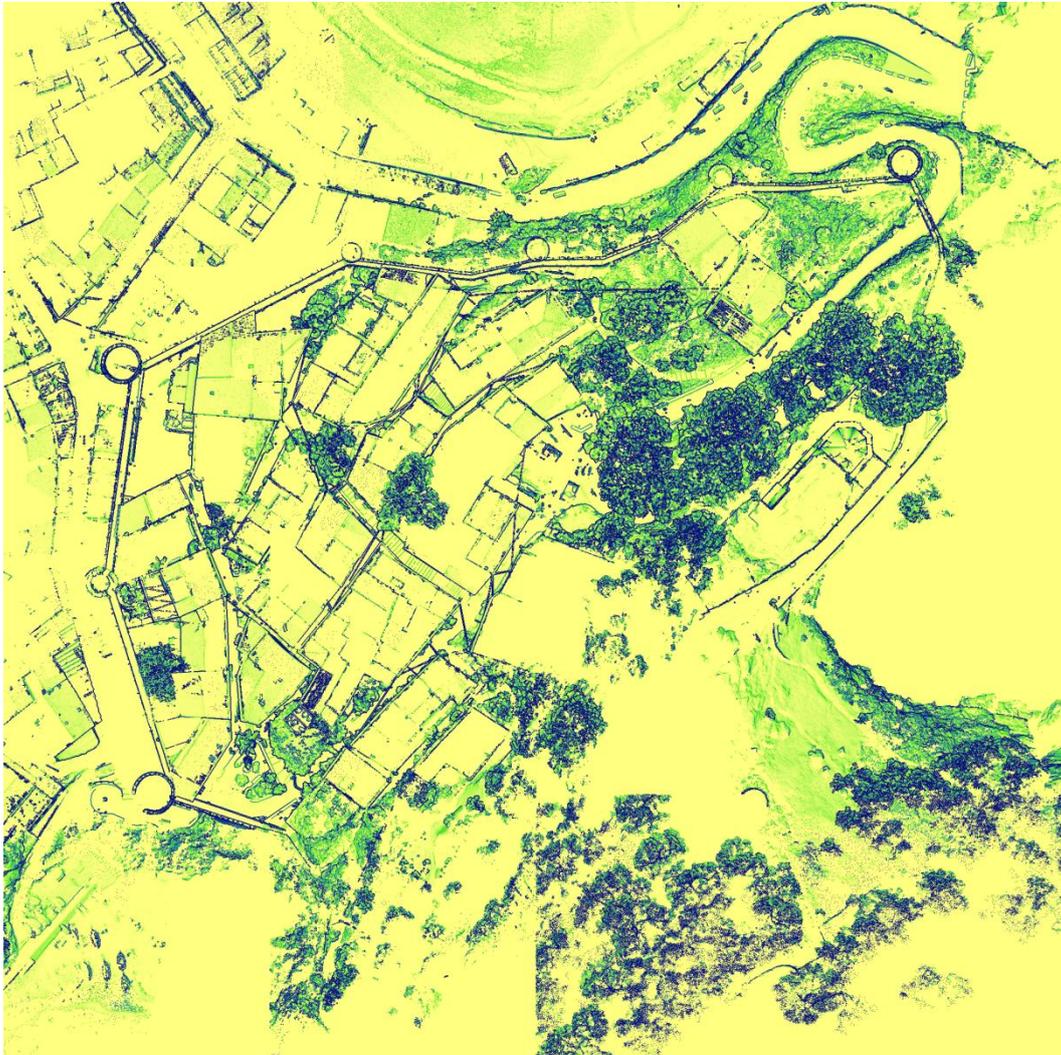
Finalmente, para profundizar en el análisis, se ha importado la información en el programa *IDRISI* de *Clark Labs*, especializado en el análisis *raster*.

En primer lugar se ha exportado el *raster* a un archivo de texto mediante el comando *Conversion Tools > From Raster > Raster to ASCII*. La importación se ha realizado con el comando *Import > Software Specific Formats > ESRI > ARCRASTER* utilizando el formato *ArInfo Raster ASCII to IDRISI* y seleccionando la referencia UTM 31N (que es la que corresponde a Tossa de Mar).

Este análisis avanzado es prometedor para la caracterización y clasificación de las superficies topográficas. En este caso se ha analizado la dimensión fractal que nos da una medida de la rugosidad del terreno (Mark & Aronson, 1984) en una ventana de

3x3¹⁶. La dimensión fractal varía entre 2.0 (amarillo) indicando una superficie suave invariante en un análisis multiescala y 3.0 (azul) indicando una superficie rugosa (Figura 35).

Figura 35: Dimensión fractal representando la rugosidad del terreno



No se han utilizado los que se detallan a continuación por las siguientes razones:

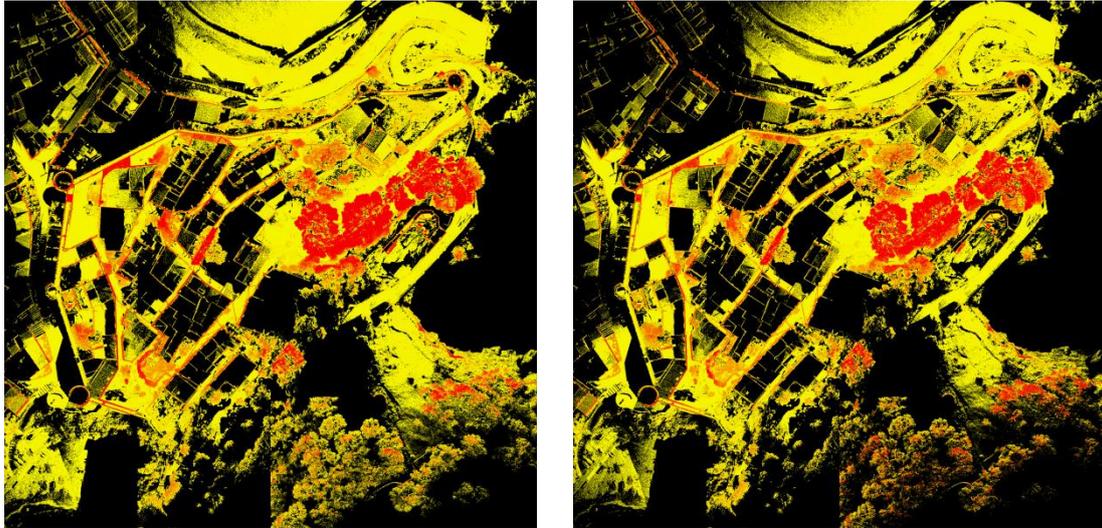
- El valor que aparece en más ocasiones (*Most Frequent*) puesto que los valores son fraccionarios y hay mucha variabilidad
- La suma de los valores de altura (*Sum*) puesto que obtendríamos la suma de las coordenadas Z.

¹⁶ En una ventana de 9x9 si el análisis se realiza en Landserf

- La media de los valores de altura (*Mean*) puesto que no nos permite distinguir ningún rasgo distintivo al diluir los valores.

La información a partir de la extracción del rango y de la desviación estándar (Figura 36) es muy parecida, debido probablemente a la regularidad de la trama del *raster*.

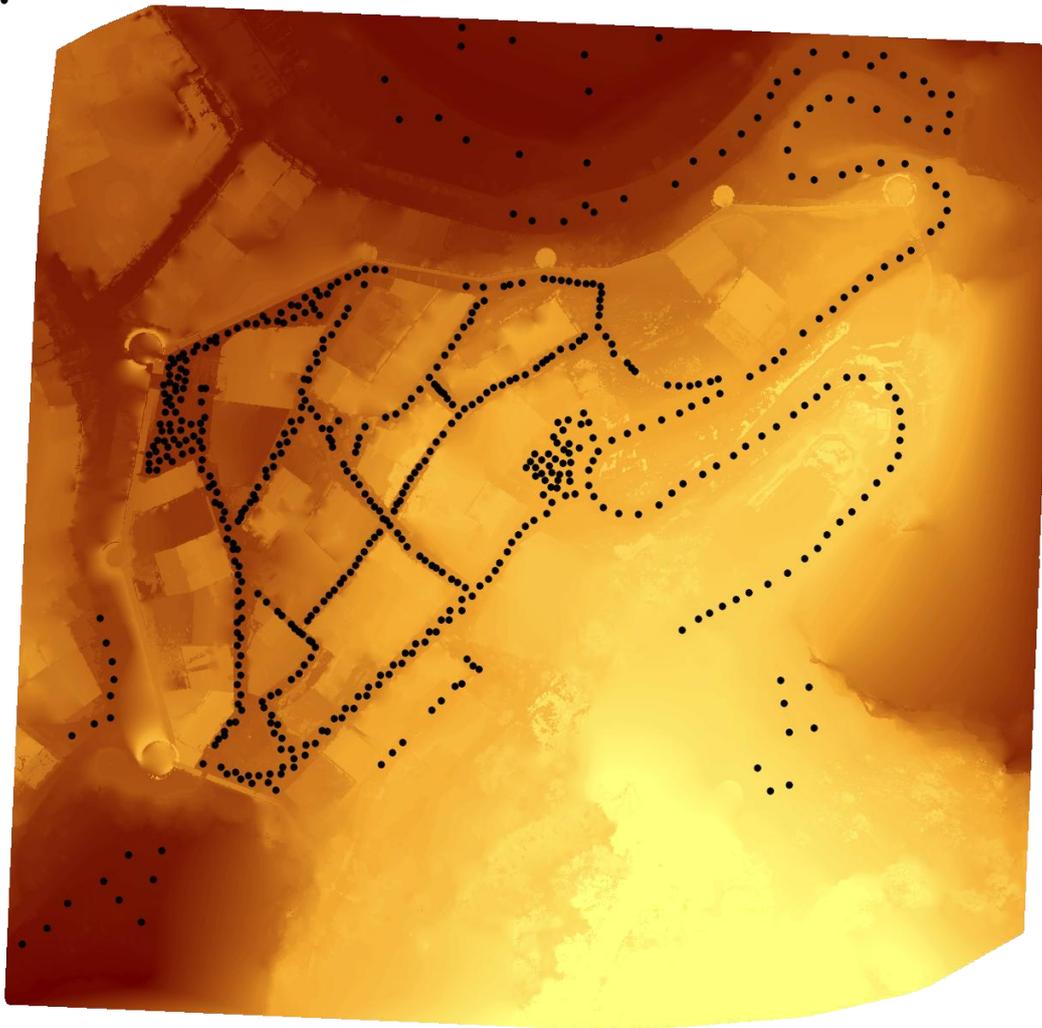
Figura 36: Rango (izquierda) y desviación estándar (derecha) del conjunto de la nube de puntos



5.3 Generación de una topografía representativa

Con la información de los candidatos se han podido digitalizar una serie de puntos 2D en ubicaciones dentro de las calles considerados por las cuatro metodologías como correctos (Figura 37).

Figura 37: Puntos evaluados para generar la topografía



A estos puntos se les ha asignado la coordenada Z proveniente del MDT mediante la herramienta *3D Analyst Tools > Functional Surface > Interpolate Shape* para asignar la coordenada Z a los puntos a partir del *raster* de elevaciones.

También se han añadido cuatro puntos en las cuatro esquinas del ámbito. Como se puede apreciar en la imagen, las coordenadas de estos puntos son desconocidas a partir de la información del LTS. Para conocer su coordenada Z, se ha inferido su

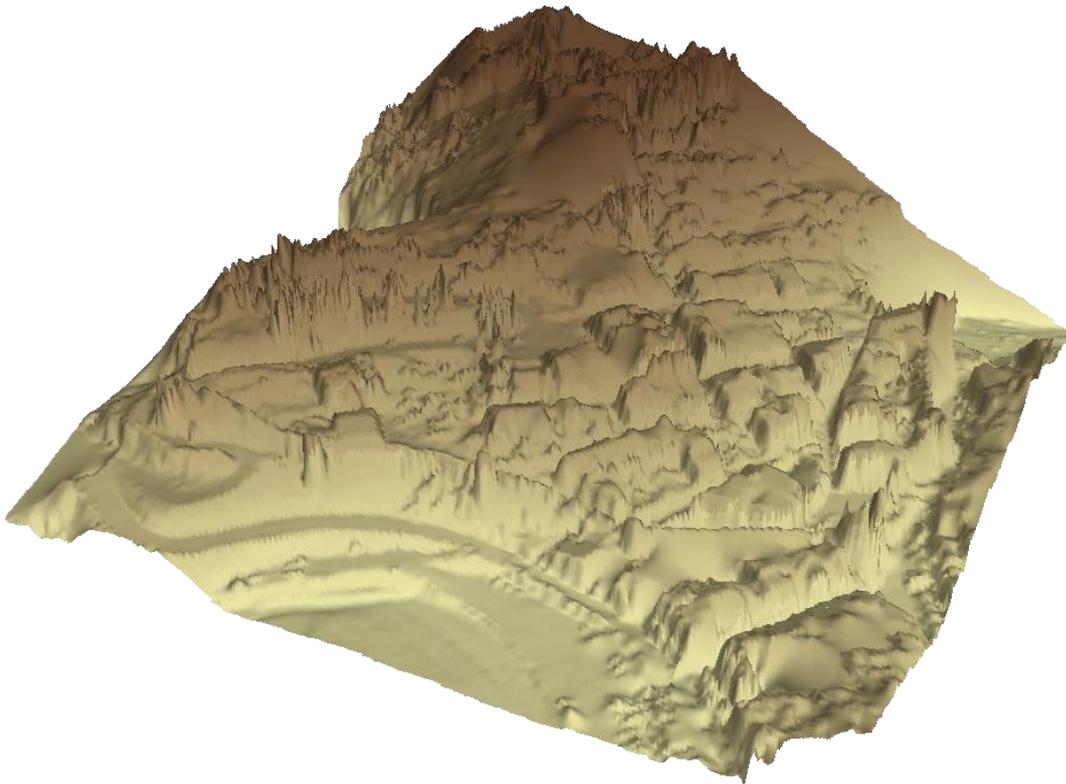
altura a partir de la información de las curvas de nivel del ICC a través de su relación con los puntos conocidos.

A partir de estos puntos en 3D obtenidos se ha generado una nueva topografía apta para la evaluación de las pendientes que evita los errores de la topografía original. Se han obtenido dos modelos del terreno: un modelo *raster* (MDT) y un TIN.

5.3.1 Generación de un Modelo Digital de Terreno

A partir de la nube de puntos interpolada con el algoritmo Natural Neighbors, que ha sido evaluado como el más adecuado para el caso estudiado, se ha elaborado un Modelo Digital de Terreno (Figura 38).

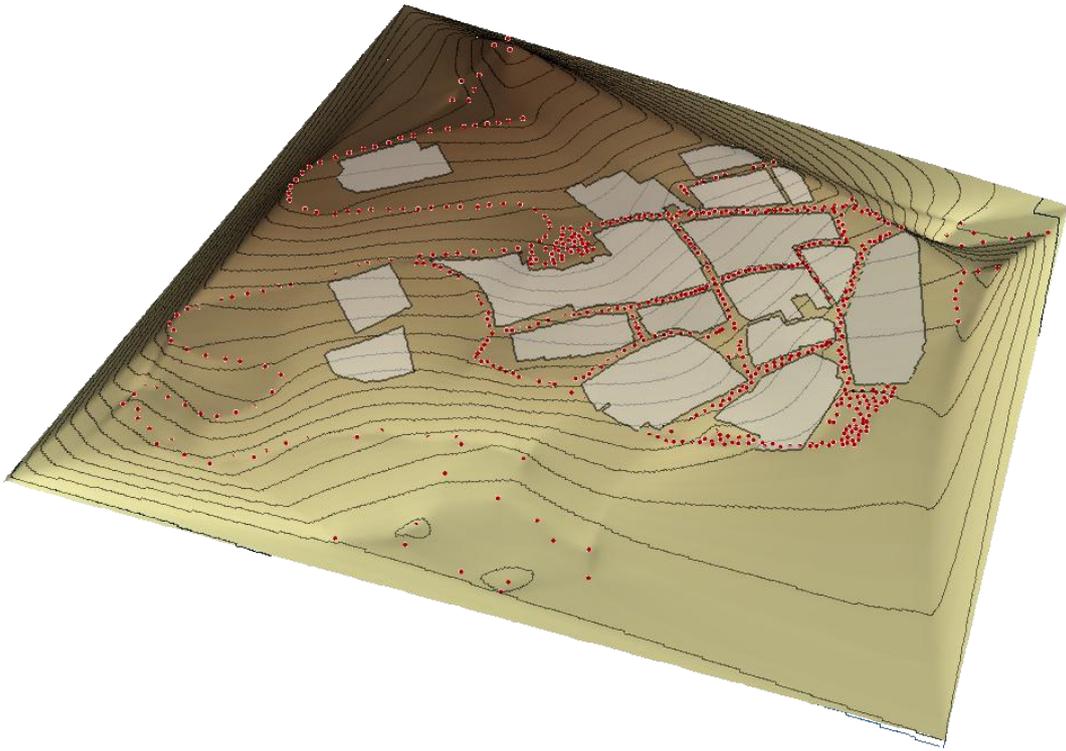
Figura 38: Modelo Digital de Terreno (interpolación Natural Neighbors) a partir de los puntos LTS



La inspección del modelo tridimensional permite apreciar que el modelo no es válido para obtener una topografía adecuada: los edificios y otras construcciones aparecen como ruido dentro de las manzanas y se distinguen otras lecturas anómalas en las calles (Yuan, Zhang, Zhang, & Gao, 2009).

Para la obtención del DTM con la topografía corregida se han utilizado los puntos anteriormente mencionados con la interpolación Natural Neighbors para obtener un nuevo DTM que representa mucho la topografía de las calles con mayor exactitud (Figura 39).

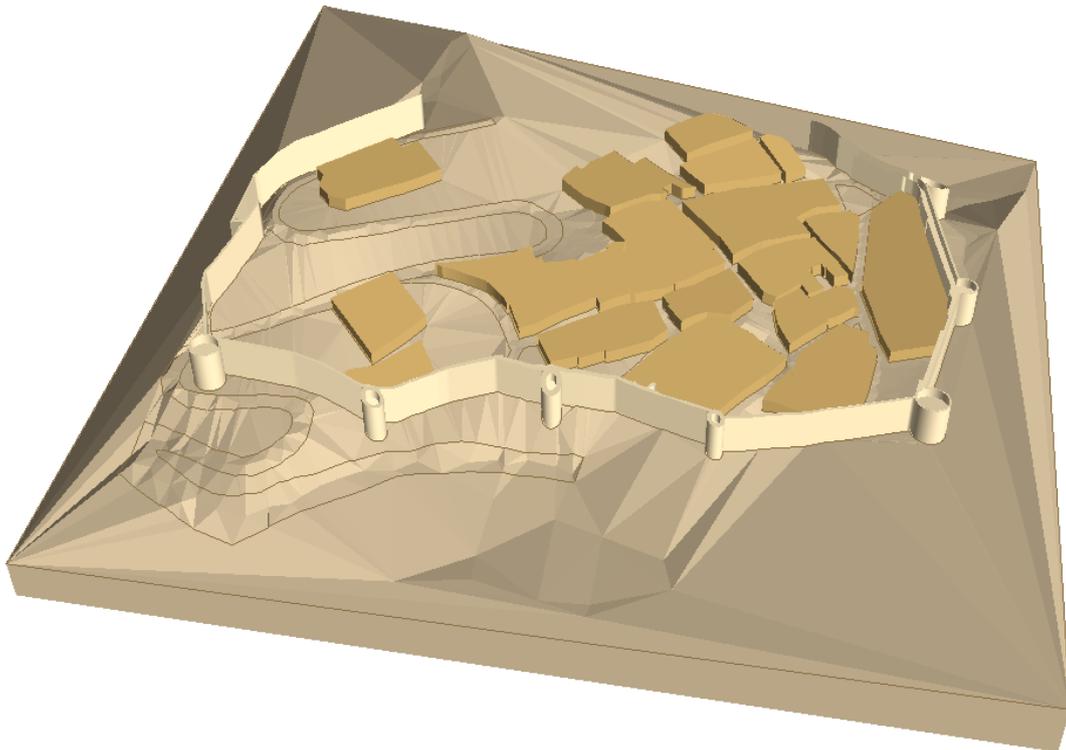
Figura 39: Modelo Digital de Terreno corregido a partir de los puntos seleccionados



5.3.2 Generación de un TIN

Para la representación del terreno también se ha generado un TIN (mediante la creación de un *Terrain*) a partir de los puntos que se ha considerado representativos de la topografía (Figura 40).

Figura 40: TIN generado a partir de los puntos seleccionados



En primer lugar, se ha tenido que calcular la distancia media entre puntos, que es desconocida. Para averiguarla, se ha utilizado la herramienta *3D Analyst Tools > Conversion > From Feature Class > Feature Class Z to ASCII* y se ha creado un fichero de de texto con la información de los puntos en formato ASCII (formato GENERATE). A partir de este archivo, con la orden *3D Analyst Tools > Conversion > From File > Point File Information* se ha obtenido una entidad *shape* con la información de la distancia media entre puntos, que ha resultado de 8,73 metros entre un total de 573 puntos.

Para la construcción del *Terrain* se han utilizado:

- Los puntos corregidos con o *mass points* (la coordenada z se obtiene de la geometría con lo opción *shape*)
- La proyección en planta de las manzanas corregida como *hard erase*

- La proyección en planta de la muralla y las torres (previamente digitalizadas a partir de la cartografía del ICC) como *hard erase*
- El límite rectangular del ámbito como *hard clip*
- Las proyección en planta de las líneas de cuneta (previamente digitalizadas a partir de la imagen *raster*) como *hard lines*

Se han creado TINs para las resoluciones 1:1000, 1:2000, 1:5000 y 1:10.000 para facilitar la visualización a distintas escalas.

Adicionalmente, para facilitar la visualización, se han realizado las siguientes operaciones:

- Extrusión las manzanas a partir de la topografía interpolada
- Extrusión la muralla a partir de la topografía interpolada (con la altura de las torres almacenada en un campo)
- Visualización de las líneas de cuneta
- Creación de una base para disponer de una referencia en los extremos del modelo

6 Identificación de los obstáculos

Debido a que el escaneado es horizontal, los puntos se acumulan en los planos verticales de manera que se aprecia una mayor densidad de puntos en la nube capturada cuando se ve en proyección horizontal (Figura 31). Sin embargo, es necesaria una metodología más precisa para poder identificar estos planos verticales y otros elementos sin depender de la densidad de la nube de puntos.

6.1 Identificación de fachadas

Con la información de la nube de puntos en *ArcGIS* se ha procedido a comprobar la información de las manzanas obtenidas del Instituto Cartográfico de Cataluña.

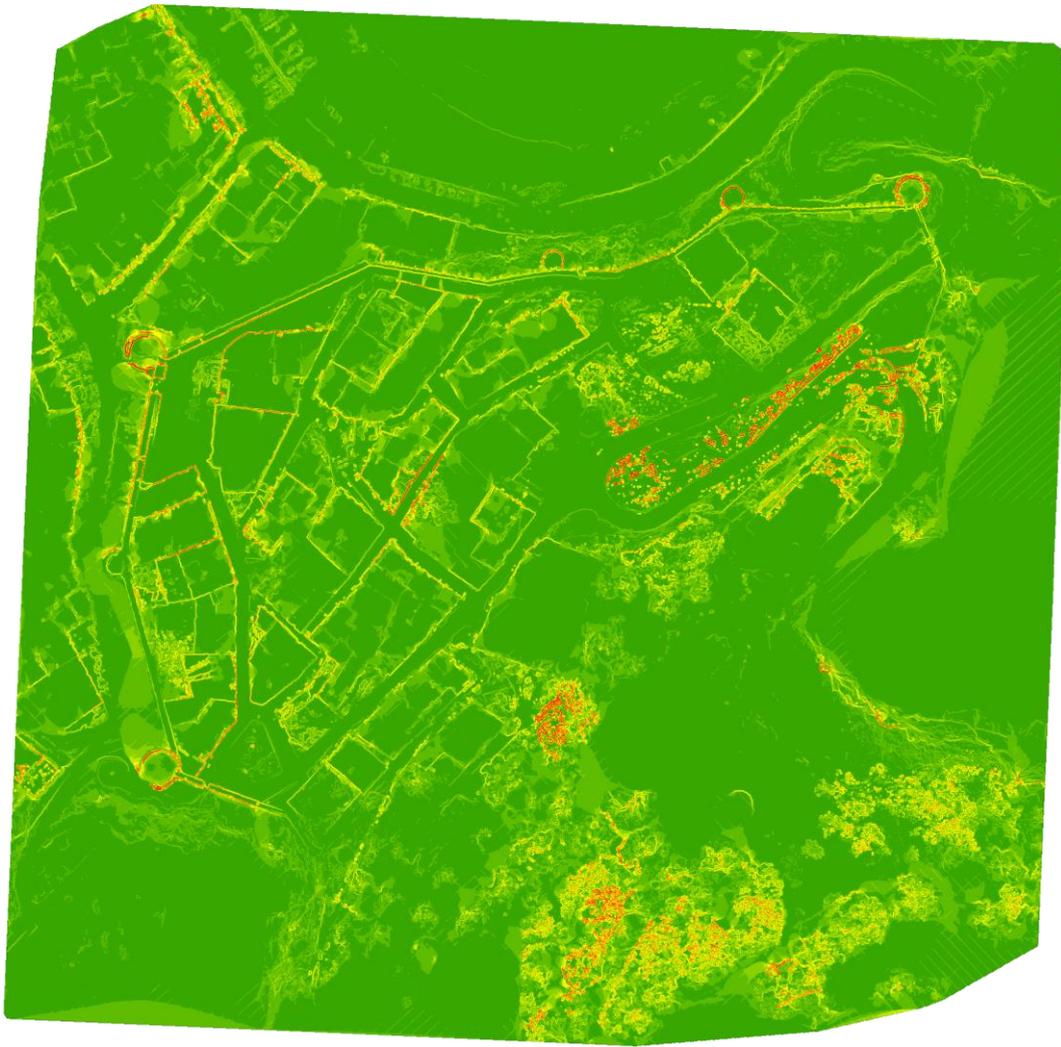
Para identificar las fachadas se han ensayado dos metodologías, las cuales permiten reconocer variaciones muy bruscas de la coordenada Z de la nube de puntos. El primer algoritmo evalúa las pendientes en cada punto para identificar los saltos próximos a 90 grados y, el segundo, evalúa el rango de variación entre todos los puntos que se encuentran a 30 cm (3 *pixels*) de distancia del punto estudiado.

Finalmente se ha optado por utilizar la primera metodología utilizando herramienta *Spatial Analyst Tools > Surface > Slope* y calculando la pendiente (PERCENT_RISE) para posteriormente tematizar los resultados (Figura 41).

Mediante esta técnica ha sido posible corregir algunas manzanas que estaban mal delimitadas en el archivo de origen e incluso ha sido necesario realizar la digitalización de algunas, las cuales sorprendentemente no aparecían en la cartografía del ICC.

Posteriormente la información de las fachadas se utilizó para digitalizar los ejes de calle entre las manzanas.

Figura 41: Detección de fachadas mediante la pendiente



6.2 Identificación de escaleras

Para poder evaluar las escaleras como obstáculo, éstas necesitan ser identificadas como tales para poder digitalizar como polígono el área que ocupan en planta.

A partir de la nube de puntos LTS es posible reconocer gran parte de los escalones debido a que el escáner barre los objetos horizontalmente y, por lo tanto, la densidad de las muestras aumenta considerablemente en los planos verticales (principalmente fachadas pero también en menor medida las contrahuellas de los escalones). Sin embargo, esta metodología no permite detectar la totalidad de los escalones, de forma que deben reconocerse de una forma distinta.

Ello es posible porque según el teorema de Nyquist-Shannon (Ecuación 4), la resolución de los puntos (10cm) permite identificar los tramos horizontales de los escalones, habitualmente alrededor de 30cm.

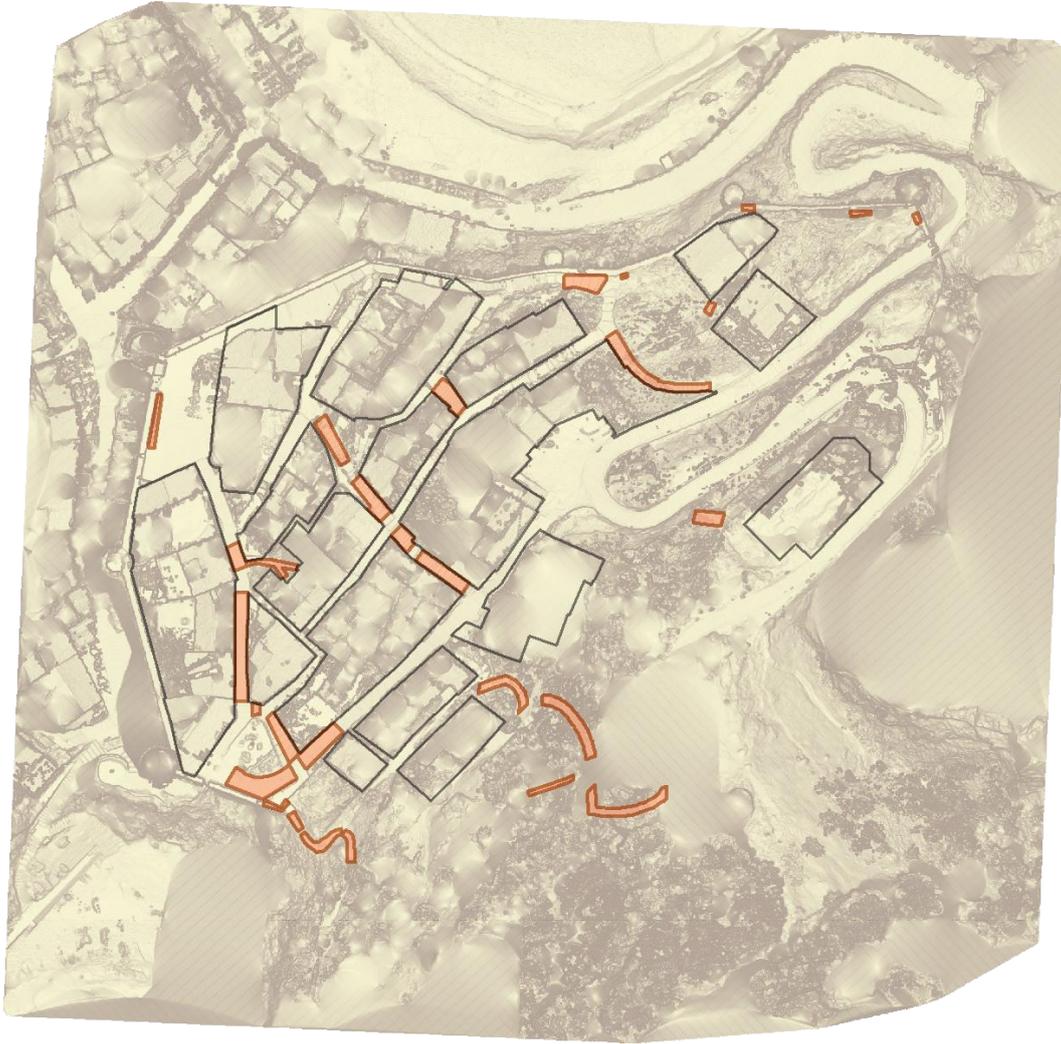
Ecuación 4: La frecuencia de muestreo permite detectar escalones

$$frecuencia\ de\ muestreo > \frac{longitud\ contrahuella}{2}$$

Para ello se ha utilizado el algoritmo de pendiente sobre el *raster* importado anteriormente, con lo que se ha obtenido el valor absoluto de la primera derivada de la superficie que representan los puntos. Una vez obtenido este mapa de pendientes se ha clasificado el *raster* resultante para poder identificar las pendientes próximas a 90 grados sexagesimales, con lo que se han podido identificar visualmente los cambios bruscos de pendiente que representan las contrahuellas. A partir de esta información se han digitalizado los polígonos correspondientes a la proyección en planta de las escaleras (Figura 42).

Una vez obtenida la capa "Obstaculo_Escalera", se ha creado un campo llamado "ESCALERA" y se ha asignado a las entidades que representan las escaleras la cadena de texto con el valor de "Escalera" como atributo.

Figura 42: Escaleras digitalizadas a partir de la información del LTS



6.3 Identificación de pasos con anchura insuficiente

La anchura mínima libre de obstáculos de una calle supone un valor a tener en cuenta para ser transitable, tanto para personas discapacitadas, en mayor o menor medida, como para el resto de la población.

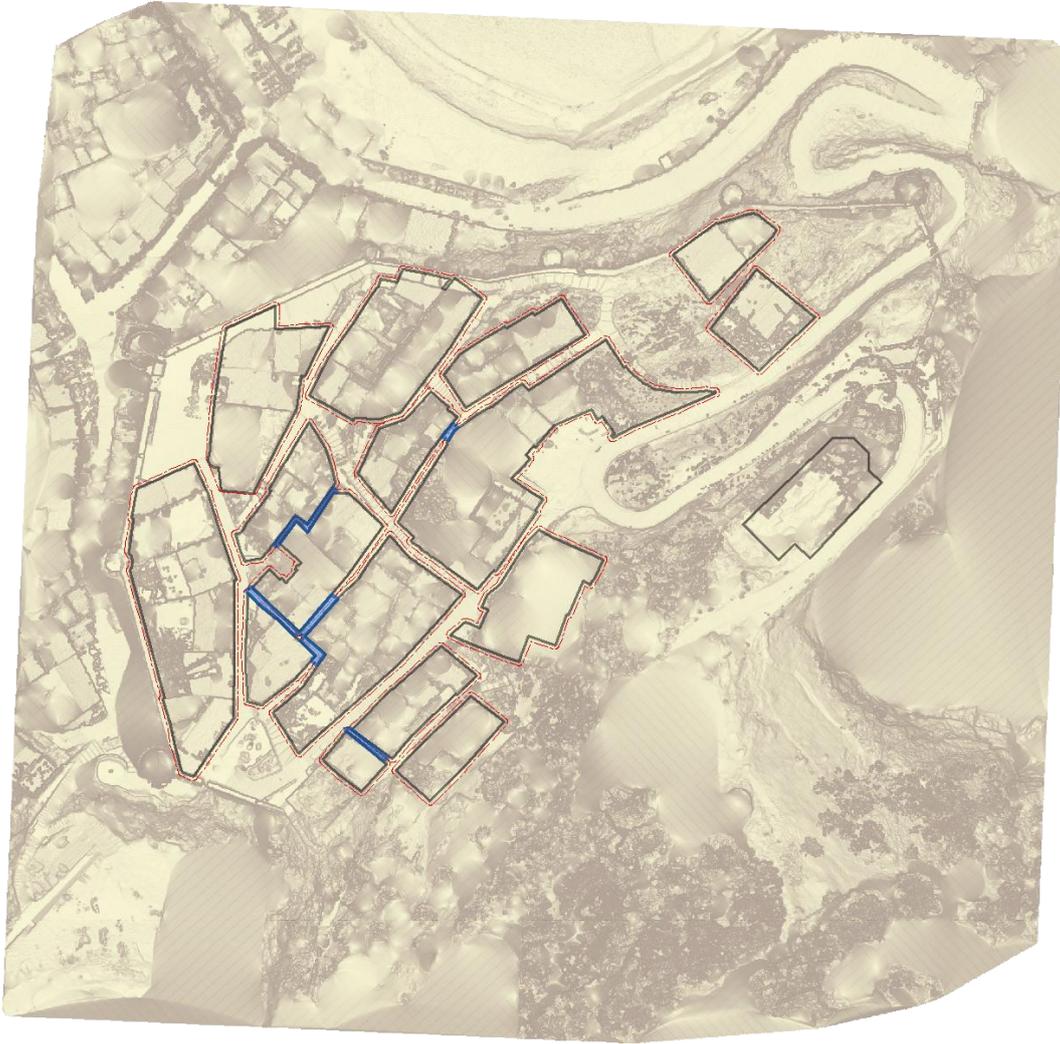
Para que el análisis de redes pueda considerar como obstáculo la anchura insuficiente, ha sido necesario en primer lugar identificar los tramos que no que no cumplan con la anchura mínima. Para ello se ha utilizado la herramienta *Analysis Tools > Proximity > Buffer* para obtener unas entidades paralelas a las manzanas con una separación de la mitad de la anchura mínima¹⁷ y se han digitalizado los polígonos que corresponden a la superposición de estos polígonos con los de las manzanas adyacentes (Figura 43).

Para asistir en la identificación de las intersecciones se ha creado una topología en *ArcGIS* con la condición *Must not overlap* de manera que las intersecciones se resalten en rojo.

Una vez obtenida la capa “Obstaculo_Anchura”, se ha creado un campo llamado “ANCHURA” y se ha asignado a las entidades que representan los pasos estrechos la cadena de texto con el valor de “Anchura” como atributo.

¹⁷ Se ha considerado como anchura mínima el valor de 1,50 m

Figura 43: Zona de anchura insuficiente



6.4 Identificación de pasos con altura insuficiente

De la misma forma como con el caso de la anchura mínima, la altura mínima libre de obstáculos de una calle supone un valor a tener en cuenta para ser transitable, tanto para personas discapacitadas, en mayor o menor medida, como para el resto de la población.

Para establecer los polígonos de altura mínima se ha examinado el modelo 3D con Pointools con ayuda de la cartografía del ICC (Figura 44) y se han digitalizado los polígonos correspondientes a las zonas con altura inferior a 2,10 metros en ArcGIS.

Una vez obtenida la capa “Obstaculo_Altura”, se ha creado un campo llamado “ALTURA” y se ha asignado a las entidades que representan zonas de altura insuficiente la cadena de texto con el valor de “Altura” como atributo (Figura 45).

Figura 44: Medición de alturas de la nube de puntos



Figura 45: Zonas de gálibo insuficiente



6.5 Identificación de zonas con iluminación inadecuada

Para establecer las zonas insuficientemente iluminadas se han hecho las siguientes de simplificaciones:

- Se ha supuesto que la radiación lumínica es de tipo esférico.
- No se han considerado las reflexiones de los elementos construidos
- No se ha tenido en cuenta la altura respecto al suelo
- Se ha considerado que el flujo lumínico que radian las luminarias es el mismo para todas ellas

Con estas simplificaciones se ha llegado a la conclusión que los puntos alejados en más de 12 metros de cualquier luminaria estaban insuficientemente iluminados. Se ha considerado evaluar distintos grados de iluminación (baja, media y alta), pero para el presente trabajo se ha optado por trabajar con este valor límite.

Como alternativa se ha estudiado trabajar con la herramienta *Spatial Analyst Tools > Density > Kernel density* (Una vez obtenida la capa "Obstaculo_Iluminacion", se ha creado un campo llamado "ILUMINACION" y se ha asignado a las entidades que representan las distancias menores de 12 la cadena de texto con el valor de "Iluminación Suficiente" como atributo.

Figura 46) y *Spatial Analyst Tools > Density > Point density* (Figura 47) que nos permite identificar las zonas mejor iluminadas.

Para conseguir representar gráficamente los puntos que estaban insuficientemente iluminados se ha partido de la información de la posición de estos, facilitada por el Ayuntamiento de Tossa de Mar, y se ha grafiado el lugar geométrico de los puntos que están a 12 m de ellos mediante la herramienta *Analysis Tools > Proximity > Buffer*. El resultado de esta operación es un polígono, los puntos interiores del cual consideraremos suficientemente iluminados y los exteriores iluminados de manera insuficiente (). Este polígono contiene un atributo con que se describe si la iluminación es o no suficiente.

Una vez obtenida la capa "Obstaculo_Iluminacion", se ha creado un campo llamado "ILUMINACION" y se ha asignado a las entidades que representan las distancias menores de 12 la cadena de texto con el valor de "Iluminación Suficiente" como atributo.

Figura 46: Densidad de farolas en un radio de 12 metros y 30 metros (Kernel Density)

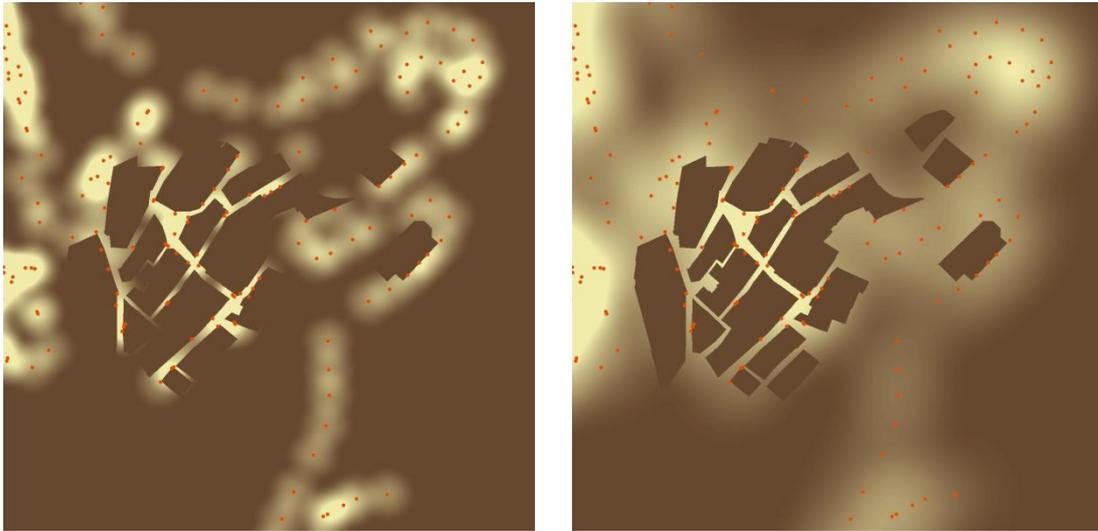


Figura 47: Densidad de farolas en un radio de 12 metros y 30 metros (Point Density)

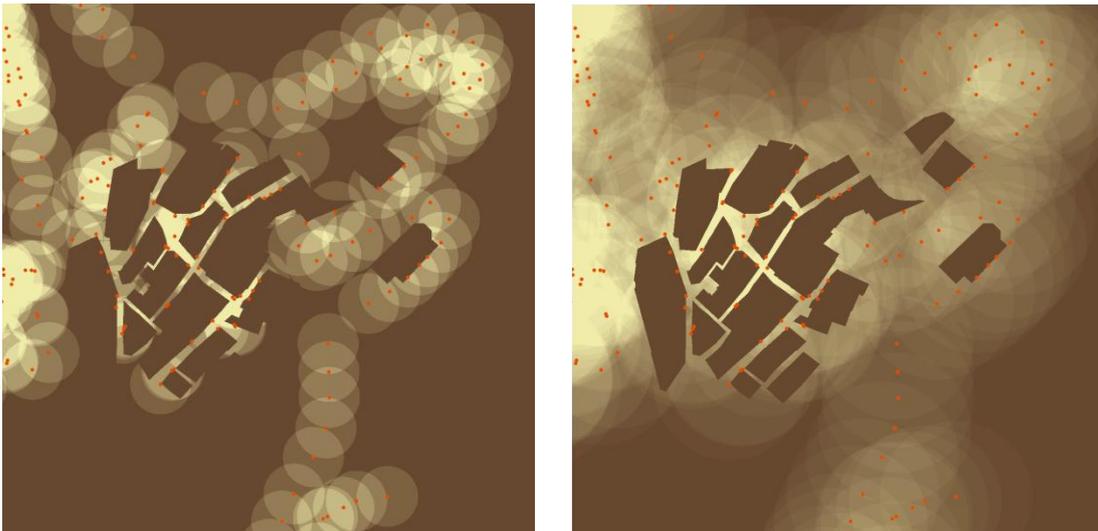
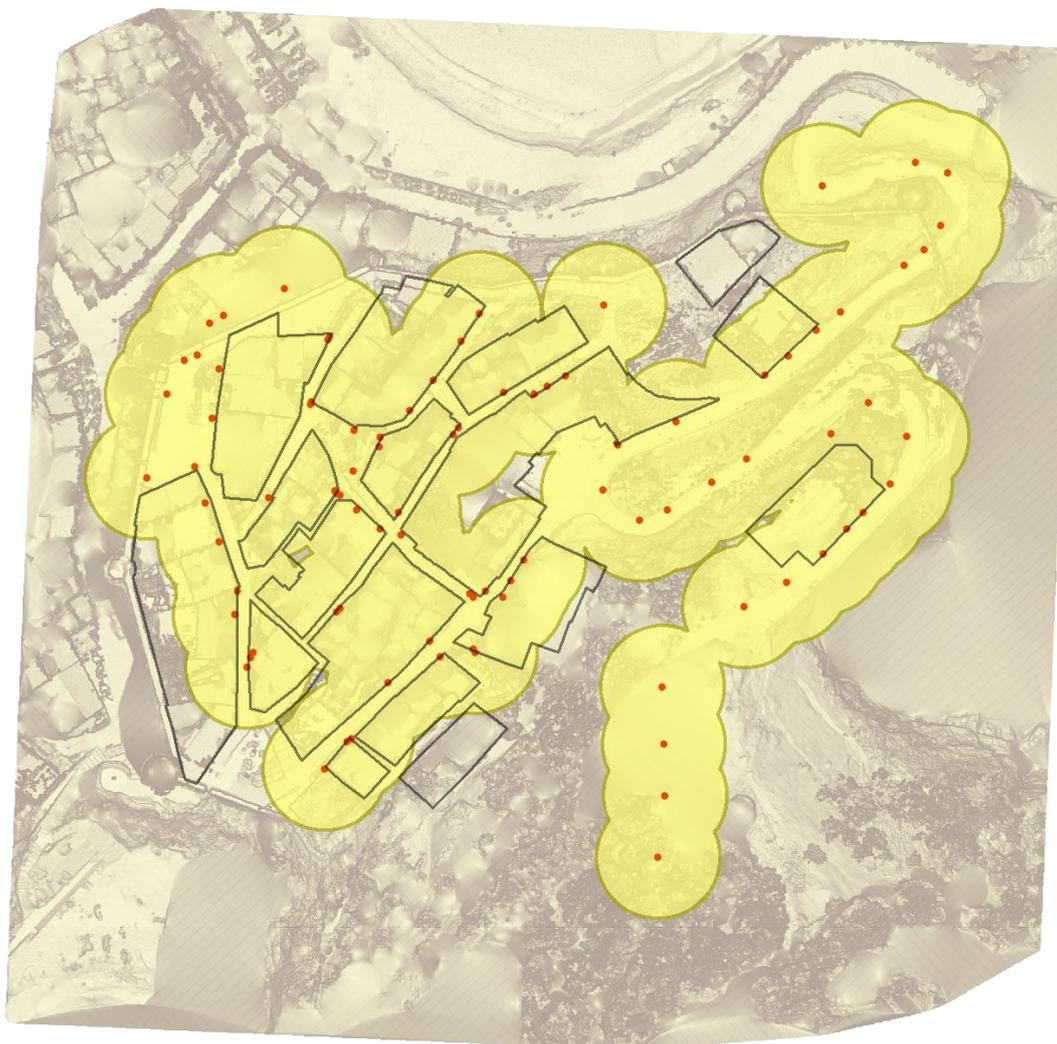


Figura 48: Zonas suficientemente iluminadas



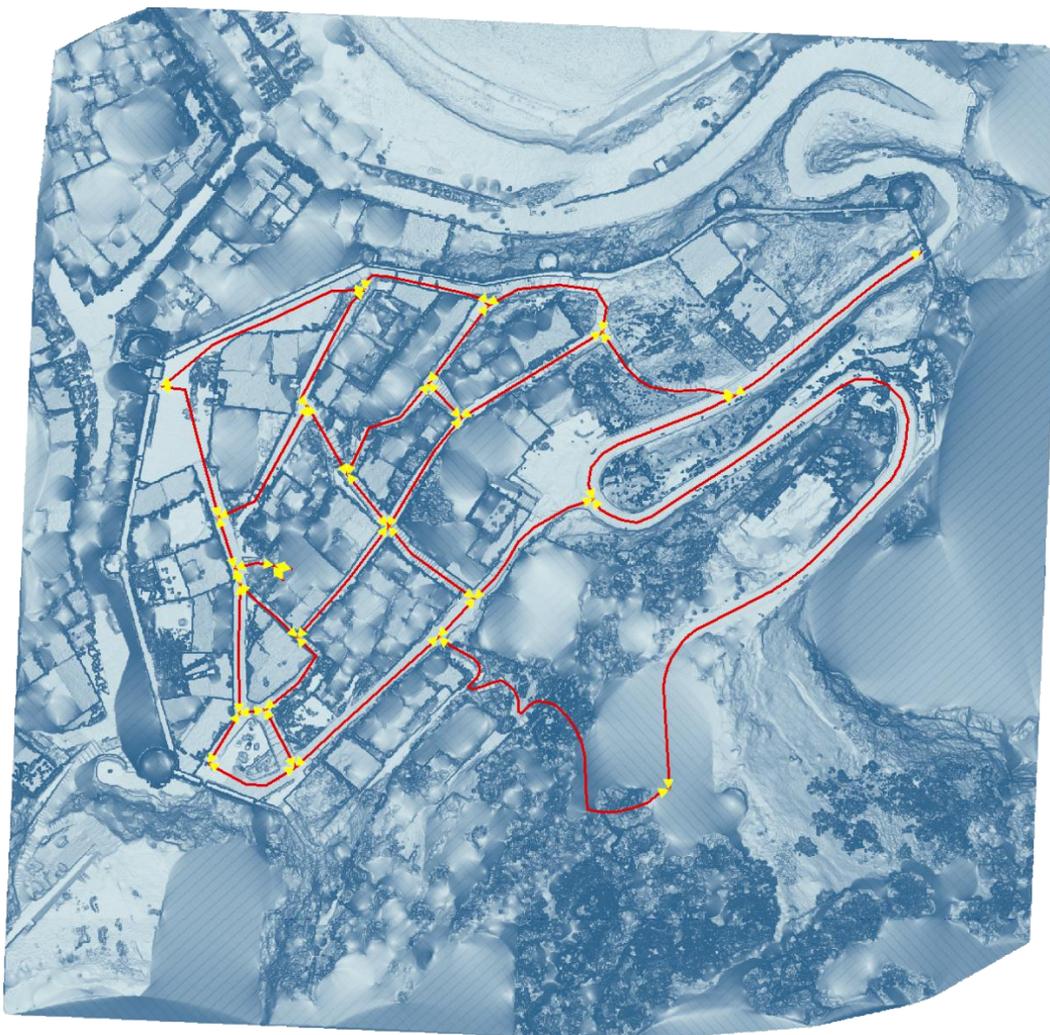
7 Preparación de la geometría para el análisis de redes

Para poder efectuar el análisis de redes necesitamos partir de un grafo plano que servirá posteriormente para construir la topología de red. Sobre este grafo de partida se realizarán una serie de operaciones que en ningún caso alterarán el hecho que sea topológicamente correcto para el análisis de redes en *ArcGIS*.

7.1 Obtención de los ejes de calles

La cartografía del ICC dispone de los ejes de calle pero es incompleta a efectos del estudio que se pretende realizar. A partir de la cartografía de las manzanas rectificadas, se han digitalizado manualmente los ejes de calle por los espacios vacíos entre las manzanas (Figura 49), para obtener un grafo sobre el que construir la red.

Figura 49: Grafo de los ejes de calle del ámbito



7.2 División de los tramos en subtramos

Los tramos obtenidos corresponden a los segmentos comprendidos entre intersecciones, de nodo a nodo. Ello conlleva dos problemas:

- Para el estudio de pendientes, podría darse el caso que la diferencia de cotas entre dos intersecciones fuera pequeña en relación con su longitud y, por lo tanto, que el cálculo de pendiente diera un resultado pequeño, mientras que la realidad física fuera de algunas secciones con una pendiente muy fuerte y otras con una pendiente muy pequeña o inexistente.
- El módulo de análisis de redes de *ArcGIS* considera la topología de red como un grafo plano entre nodos¹⁸, de manera que la presencia de obstáculos en un segmento invalida la totalidad del segmento entre los dos nodos, cosa que no nos permite evaluar correctamente las rutas.

Por estas dos razones, se ha decidido dividir los tramos originales en subtramos de longitud igual o inferior a un metro (longitud aproximada de un paso) para poder representar con mayor fidelidad las variaciones de pendiente. Para ello, se ha optado por utilizar la herramienta *Feature Conversion > Split Polylines > Equal Segments* de la extensión *XTools Pro 6.2.1* de la compañía *Data East*.

Alternativamente, es posible realizar la división de manera manual mediante la selección de cada tramo y la herramienta *Editor > Split*.

Otras alternativas evaluadas pero finalmente desechadas fueron:

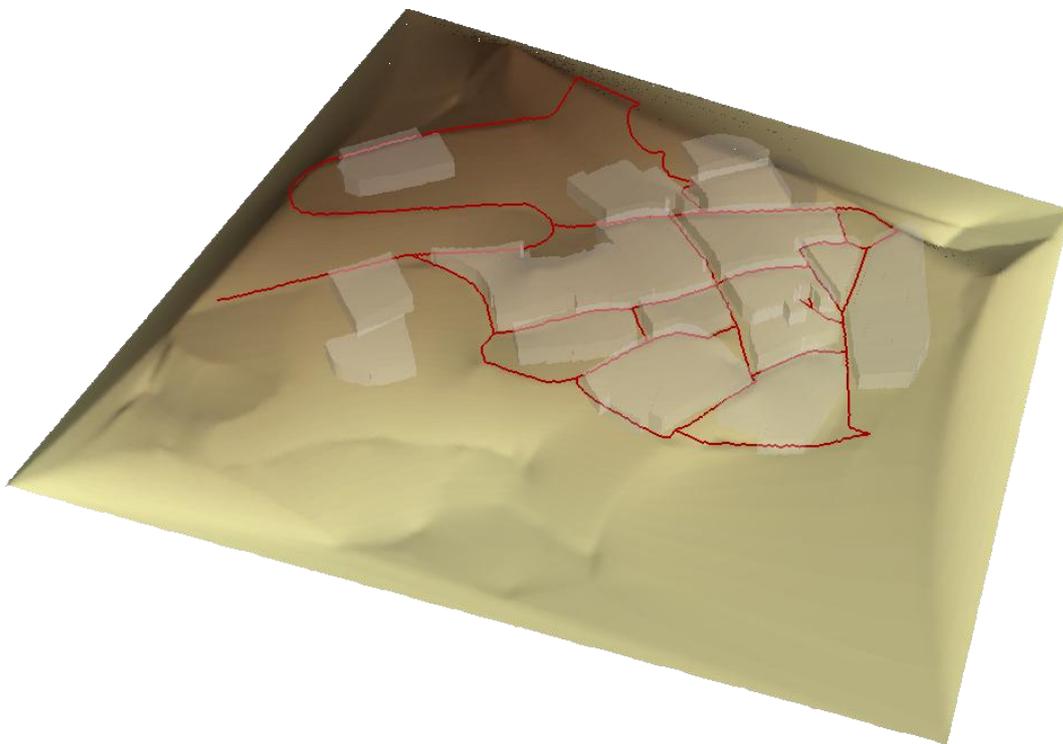
- Dividir los tramos en su intersección con las curvas de nivel
- Dividir los tramos en su intersección con una retícula regular (*fishnet*)

¹⁸ Esta funcionalidad será añadida en la próxima versión *ArcGIS* 10.0

7.3 Obtención de las rutas en 3D

Para poder calcular la pendiente de los tramos ha sido necesario en primer lugar convertir las rutas de 2D a 3D. Para ello, se ha generado una superficie 3D a partir de la nube de puntos por interpolación mediante la herramienta *3D Analyst Tools > Functional Surface > Interpolate Shape* y se ha drapeado la ruta 2D para que recogiera los valores de la coordenada Z de la superficie generada previamente en una polilínea 3D (Figura 50).

Figura 50: Rutas 3D adoptando la coordenada vertical de la superficie topográfica rectificada



El resultado contrasta con la interpolación con la topografía obtenida directamente del LTS (Figura 51) y como resultado se han eliminado los errores en la topografía (Figura 52).

Figura 51: Rutas 3D adoptando la coordenada vertical de la superficie topográfica original

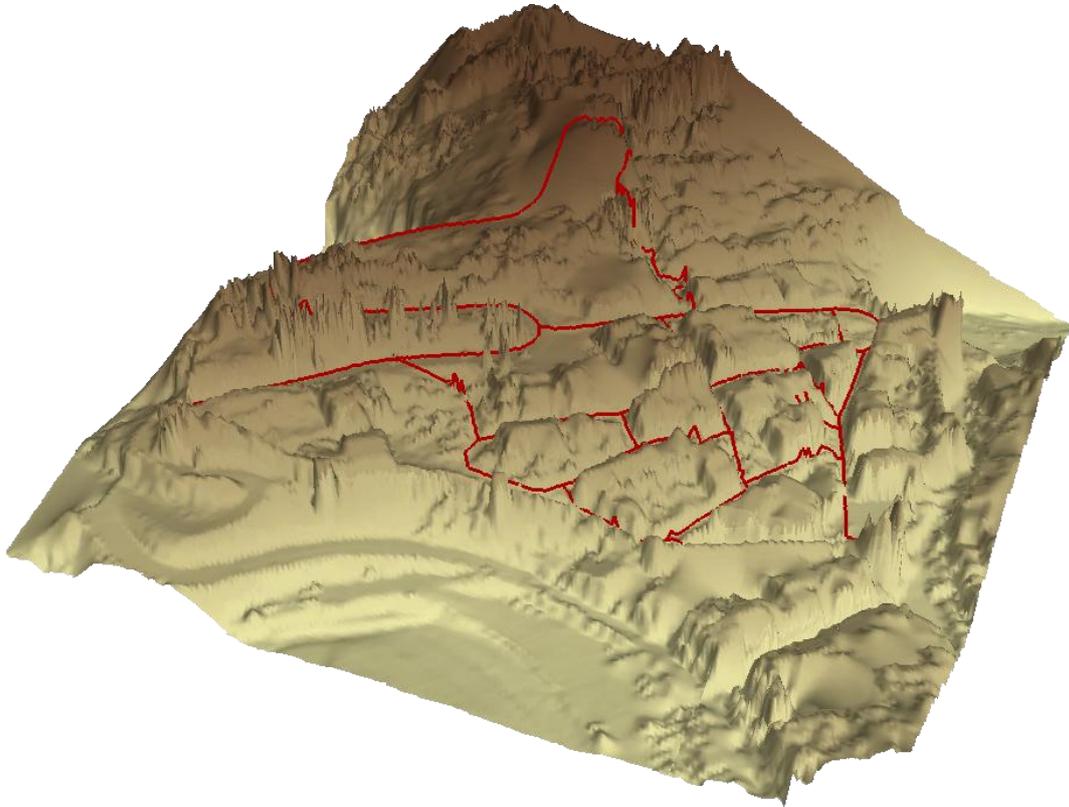
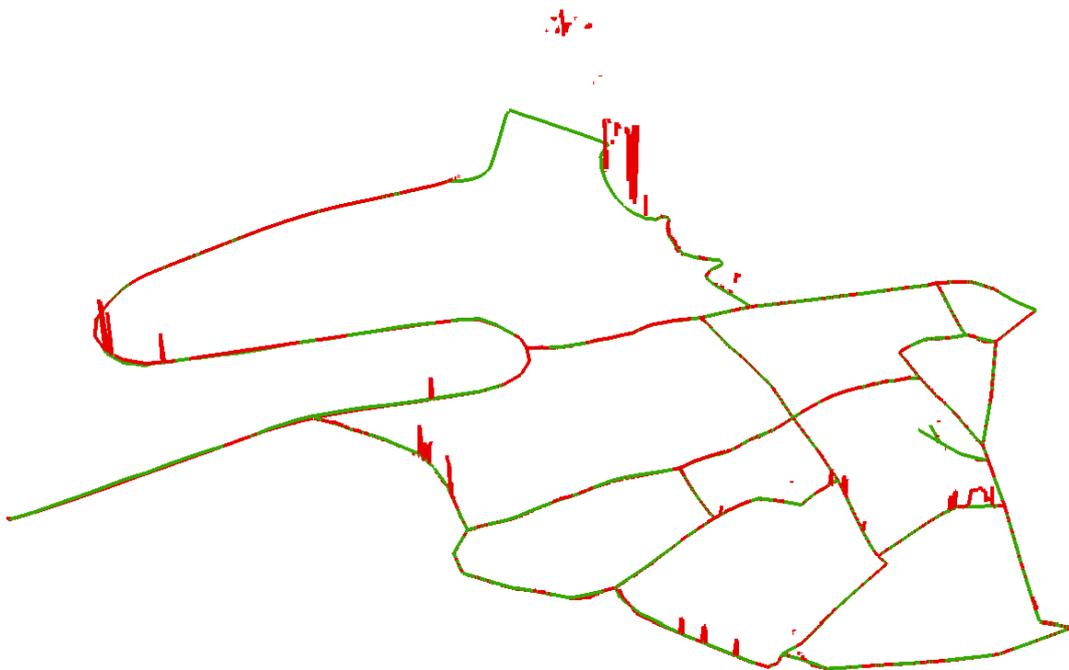


Figura 52: Rutas 3D antes (rojo) y después (verde) de la corrección



7.4 Incorporación de la información de la pendiente de cada subtramo

Para poder calcular la pendiente en cada tramo ha sido necesario desarrollar una serie de rutinas utilizando los entornos de programación *ModelBuilder* de *ArcGIS* y *Visual Basic* de *Microsoft* (Figura 53).

Figura 53: Diagrama de bloques del modelo de cálculo de pendientes¹⁹



El módulo desarrollado crea seis campos para describir los puntos iniciales y finales de cada subtramo y utiliza unas rutinas desarrolladas en *VisualBasic* para extraer las coordenadas correspondientes de cada extremo de subtramo (inicio y final), las cuales son almacenadas para cada tramo en sus respectivos campos.

Una vez calculadas las seis coordenadas, se crea un campo nuevo para alojar el valor de la pendiente, que es calculada mediante la fórmula siguiente (Ecuación 5):

Ecuación 5: Fórmula utilizada para calcular la pendiente en cada tramo

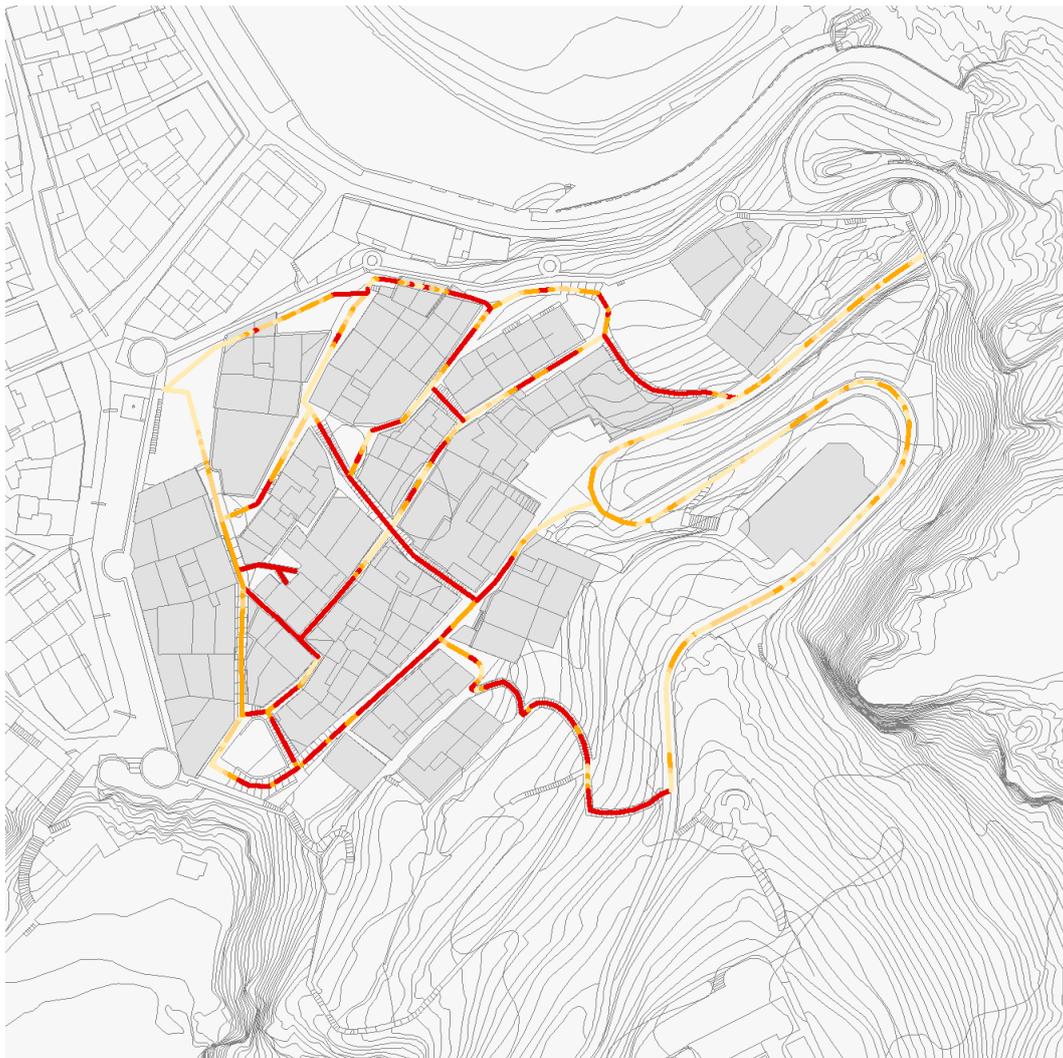
$$Pendiente (\%) = 100 \cdot Abs \left(\frac{Z_f - Z_i}{\sqrt{(X_f - X_i)^2 + (Y_f - Y_i)^2}} \right)$$

Con esta fórmula se obtiene el valor absoluto de la pendiente en cada tramo. Una vez obtenidas las pendientes y asignadas como un atributo al campo correspondiente en cada tramo, se eliminan los campos auxiliares creados para su cálculo. A partir de

¹⁹ Véase código *VisualBasic* en apartado 12.2 (página 141)

estos datos se ha realizado un mapa temático para verificar visualmente la variación de los valores de cada tramo (Figura 54), de manera que se grafían en rojo las pendientes superiores al 12% y con una rampa de colores las inferiores al 6%, al 8% y al 12% respectivamente.

Figura 54: Mapa temático de pendientes de los subtramos

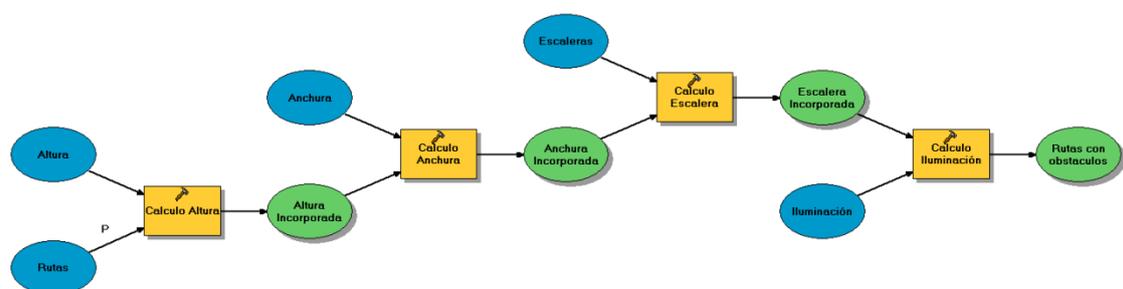


7.5 Incorporación de la información de los obstáculos

A partir de las entidades (polígonos) que representan los tipos de obstáculos considerados (las escaleras, la altura, la anchura y la iluminación insuficiente) se ha procedido a asignar como atributo el tipo o tipos de obstáculo a cada tramo de ruta afectado.

Para ello se ha desarrollado un módulo en Model Builder que interseca de manera secuencial cada una de las entidades que representan obstáculos con los tramos de ruta (Figura 55).

Figura 55: Diagrama de bloques del módulo de cálculo de obstáculos²⁰



Con este proceso conseguimos preparar los subtramos para ser evaluados por el módulo de cálculo de rutas:

- Se corta el tramo con la entidad obstáculo correspondiente, de manera que se obtienen fragmentos de subtramos dentro y fuera del polígono que se interseca
- Se agregan cuatro campos nuevos en la información de los tramos: “ALTURA”, “ANCHURA”, “ESCALERA” e “ILUMINACION”
- Se asigna el valor de tipo de obstáculo correspondiente a los fragmentos de subtramo obtenidos a partir de la información que han heredado del polígono que representaba el obstáculo.

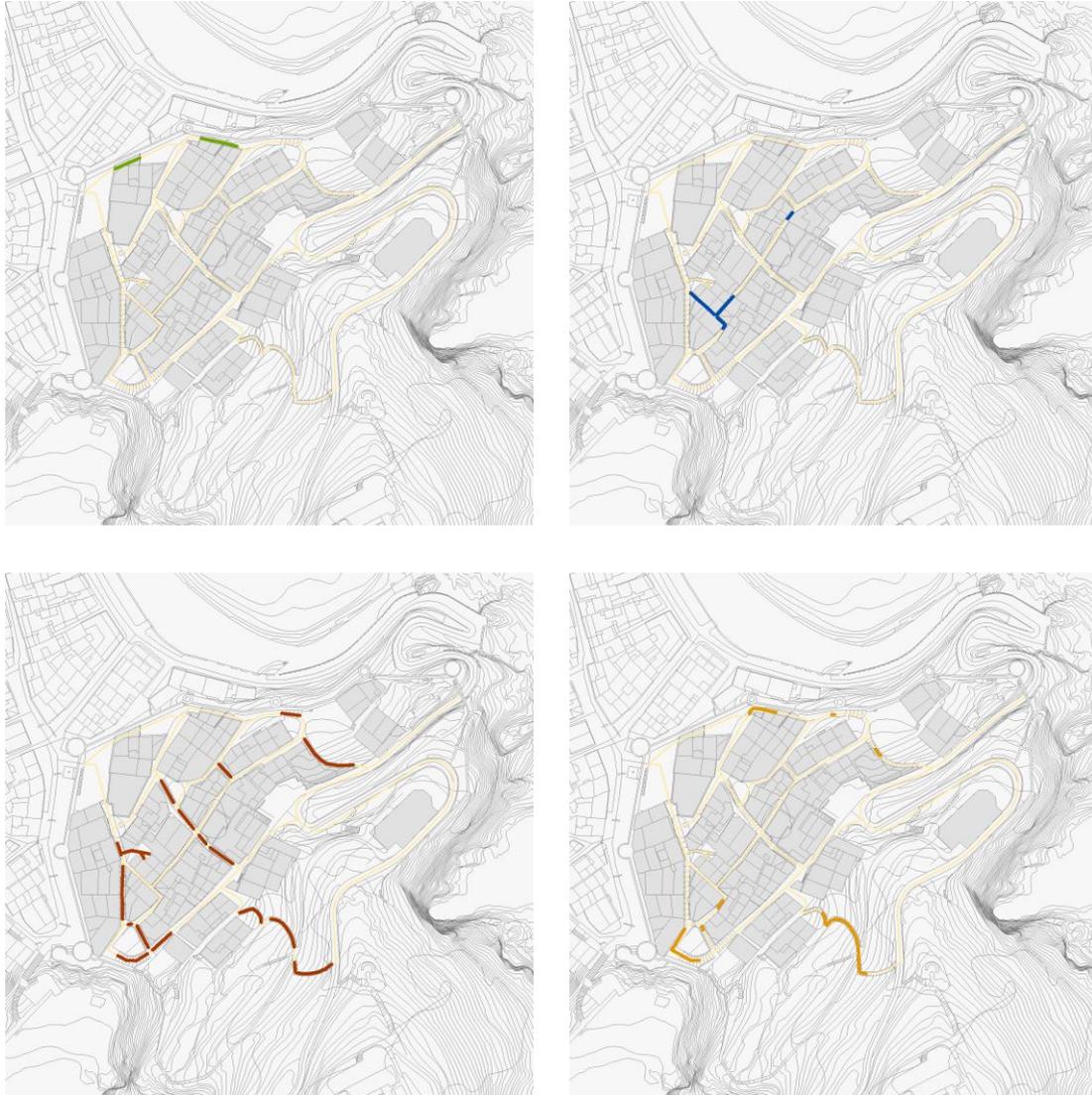
Los resultados obtenidos pueden verse en un mapa temático para comprobar la correcta ejecución del módulo (Figura 56) e individualmente para los visualizar los tramos afectados por los cuatro tipos de obstáculos considerados: Altura insuficiente en verde, anchura insuficiente en azul, presencia de escaleras en rojo e iluminación insuficiente en naranja (Figura 57).

²⁰ Véase código *VisualBasic* en apartado 12.3 (página 144)

Figura 56: Mapa temático con el tipo de obstáculo en los tramos



Figura 57: Tramos de ruta afectados por altura, anchura, escaleras, iluminación insuficiente



8 Definición de las redes para el análisis

Una vez preparada la geometría es necesario construir la topología de red en *ArcGIS*²¹ para poder efectuar los análisis con el modulo *Network Analyst*.

Desde el punto de vista geométrico, el proceso para generar la red ha partido de una red inicial que siguiendo los ejes de calle, con nodos en sus intersecciones. La red de partida es una red topológicamente correcta a efectos de efectuar un análisis de redes (se trata de un grafo plano).

Las operaciones que se han realizado sobre este grafo inicial han sido de dos tipos:

- Fraccionamiento de las entidades en segmentos más pequeñas
- Adición de campos y asignación de atributos

Ninguna de estas operaciones ha alterado la red de manera que se impidiera realizar el análisis de redes puesto que continúa siendo apta para poder construir una red a partir de los puntos extremos de los subtramos generados. Asimismo, incorpora la información necesaria para especificar las restricciones y los valores necesarios para poder ser evaluada desde el punto de vista de la accesibilidad.

Para evaluar las rutas óptimas se han construido tres redes unimodales en *ArcGIS*: la primera evalúa la ruta óptima con criterios para usuarios estándar, la segunda la evalúa para usuarios con movilidad reducida y la tercera para usuarios en silla de ruedas.

²¹ Inicialmente se preveía utilizar el programa *TransCAD* pero finalmente se optó por el software *ArcGIS* y la extensión *Network Analyst* para poder trabajar en un único entorno.

8.1 Definición de la red para usuarios estándar

Para crear la red para evaluar las rutas para los usuarios estándar, han seguido los siguientes pasos:

- Crear un *feature dataset* que contendrá las *feature classes*, teniendo en cuenta que la referencia espacial debe ser la misma (con el nombre Red_STD)
- Copiar la *feature class* obtenida en los pasos anteriores dividida en subtramos, con las pendientes calculadas y los atributos de los obstáculos asignados (Rutas_STD)
- Crear un *network dataset* dentro de la *feature dataset* mediante el asistente en *ArcCatalog*.
- Se especifica en el asistente que la conectividad se establece a partir de los puntos finales de los tramos, no se considera ni la elevación y no se modelan los cambios de dirección.
- Como resultado, se generaran dos *feature datasets*: Rutas_STD_ND y Rutas_STD_ND_Junctions
- El asistente crea Rutas_STD_ND que contiene la topología de red que el programa construye a partir de Red_STD
- El asistente crea Rutas_STD_ND_Junctions que contiene los puntos extremos de los tramos de la red generada

Los criterios para evaluar las rutas para los usuarios estándar han sido:

- Minimizar la distancia recorrida entre las paradas
- Evitar los tramos con altura insuficiente

A partir de estas premisas se han definido dos evaluadores:

- Un evaluador de coste de distancia llamado EV_Distancia (Tabla 1)
- Un evaluador de restricción para evitar los tramos con altura insuficiente llamado RE_Altura (Tabla 2)

Tabla 1: Evaluador de distancia de la red para usuario estándar

Evaluador EV_Distancia (usuario estándar)	
Evaluado por defecto	Si
Parameters	None
Usage	Cost
Units	Meters
Data type	Double
Source Type	Field
Source Value	Shape_Length
Default Values Type	Constant
Default Value	0

Tabla 2: Evaluador de restricción de altura de la red para usuario estándar

Evaluador RE_Altura (usuario estándar)	
Evaluado por defecto	Si
Parameters	None
Usage	Restriction
Units	Undefined
Data type	Boolean
Source Type	Field
Source Value	Expression (se evalúa el valor "ALTURA")
Pre-Logic VBscript	<pre>if [OBST_ALTURA] = "ALTURA" then ALTURA = 1</pre>
Default Values Type	Constant
Default Value	Transversable

8.2 Definición de la red para usuarios con movilidad reducida

Para crear la red para evaluar las rutas para los usuarios con movilidad reducida, se han seguido los siguientes pasos:

- Crear un *feature dataset* que contendrá las *feature classes*, teniendo en cuenta que la referencia espacial debe ser la misma (con el nombre Red_MR)
- Copiar la *feature class* obtenida en los pasos anteriores dividida en subtramos, con las pendientes calculadas y los atributos de los obstáculos asignados (Rutas_MR)
- Crear un *network dataset* dentro de la *feature dataset* mediante el asistente en *ArcCatalog*.
- Se especifica en el asistente que la conectividad se establece a partir de los puntos finales de los tramos, no se considera ni la elevación y no se modelan los cambios de dirección.
- Como resultado, se generaran dos *feature datasets*: Rutas_MR_ND y Rutas_MR_ND_Junctions
- El asistente crea Rutas_MR_ND que contiene la topología de red que el programa construye a partir de Red_STD
- El asistente crea Rutas_MR_ND_Junctions que contiene los puntos extremos de los tramos de la red generada

Los criterios para evaluar las rutas para los usuarios estándar han sido:

- Minimizar la distancia recorrida entre las paradas
- Evitar transitar por escaleras
- Evitar los tramos con altura insuficiente
- Evitar los tramos con anchura insuficiente
- Evitar los tramos con iluminación insuficiente

A partir de estas premisas se han definido cinco evaluadores:

- Un evaluador de coste de distancia llamado EV_Distancia (Tabla 3)
- Un evaluador de restricción para evitar los tramos con altura insuficiente llamado RE_Altura (Tabla 4)
- Un evaluador de restricción para evitar los tramos con anchura insuficiente llamado RE_Anchura (Tabla 5)

- Un evaluador de restricción para evitar los tramos con presencia de escaleras llamado RE_Escaleras (Tabla 6)
- Un evaluador de restricción para evitar los tramos con iluminación inadecuada llamado RE_Iluminacion (Tabla 7)

Tabla 3: Evaluador de distancia de la red para usuario con movilidad reducida

Evaluador EV_Distancia (usuario con movilidad reducida)	
Evaluado por defecto	Si
Parameters	None
Usage	Cost
Units	Meters
Data type	Double
Source Type	Field
Source Value	Shape_Length
Default Values Type	Constant
Default Value	0

Tabla 4: Evaluador de restricción de altura de la red para usuario con movilidad reducida

Evaluador RE_Altura (usuario con movilidad reducida)	
Evaluado por defecto	Si
Parameters	None
Usage	Restriction
Units	Undefined
Data type	Boolean
Source Type	Field
Source Value	Expression (se evalua el valor "ALTURA")
Pre-Logic VBscript	if [OBST ALTURA] = "ALTURA" then ALTURA = 1
Default Values Type	Constant
Default Value	Transversable

Tabla 5: Evaluador de restricción de anchura de la red para usuario con movilidad reducida

Evaluador RE_Anchura (usuario con movilidad reducida)	
Evaluado por defecto	Si
Parameters	None
Usage	Restriction
Units	Undefined
Data type	Boolean
Source Type	Field
Source Value	Expression (se evalua el valor "ANCHURA")
Pre-Logic VBscript	<code>if [OBST_ANCHURA] = "ANCHURA" then ANCHURA = 1</code>
Default Values Type	Constant
Default Value	Transversable

Tabla 6: Evaluador de restricción de escaleras de la red para usuario con movilidad reducida

Evaluador RE_Escaleras (usuario con movilidad reducida)	
Evaluado por defecto	Si
Parameters	None
Usage	Restriction
Units	Undefined
Data type	Boolean
Source Type	Field
Source Value	Expression (se evalua el valor "ESCALERA")
Pre-Logic VBscript	<code>if [OBST_ESCALERA] = "ESCALERA" then ESCALERA = 1</code>
Default Values Type	Constant
Default Value	Transversable

Tabla 7: Evaluador de restricción de iluminación de la red para usuario con movilidad reducida

Evaluador RE_Iluminacion (usuario movilidad reducida)	
Evaluado por defecto	No
Parameters	None
Usage	Restriction
Units	Undefined
Data type	Boolean
Source Type	Field
Source Value	Expression (se evalua el valor "ILUMINACION")
Pre-Logic VBscript	<pre>if [ILUMINACION] <> "ILUMINACION SUFICIENTE" then ILUMINACION = 1</pre>
Default Values Type	Constant
Default Value	Transversable

8.3 Definición de la red para usuarios en silla de ruedas

Para crear la red para evaluar las rutas para los usuarios con movilidad reducida, se han seguido los siguientes pasos:

- Crear un *feature dataset* que contendrá las *feature classes*, teniendo en cuenta que la referencia espacial debe ser la misma (con el nombre Red_SR)
- Copiar la *feature class* obtenida en los pasos anteriores dividida en subtramos, con las pendientes calculadas y los atributos de los obstáculos asignados (Rutas_SR)
- Crear un *network dataset* dentro de la *feature dataset* mediante el asistente en *ArcCatalog*.
- Se especifica en el asistente que la conectividad se establece a partir de los puntos finales de los tramos, no se considera ni la elevación y no se modelan los cambios de dirección.
- Como resultado, se generaran dos *feature datasets*: Rutas_SR_ND y Rutas_SR_ND_Junctions
- El asistente crea Rutas_SR_ND que contiene la topología de red que el programa construye a partir de Red_STD
- El asistente crea Rutas_SR_ND_Junctions que contiene los puntos extremos de los tramos de la red generada

Los criterios para evaluar las rutas para los usuarios estándar han sido:

- Minimizar la distancia recorrida entre las paradas
- Evitar transitar por escaleras
- Evitar circular por tramos con altura insuficiente
- Evitar circular por tramos con anchura insuficiente
- Evitar los tramos con iluminación insuficiente
- Evitar los tramos con pendiente superior al 12%

A partir de estas premisas se han definido siete evaluadores:

- Un evaluador de coste de distancia llamado EV_Distancia (Tabla 8)
- Un evaluador de coste de pendiente llamado EV_Pendiente (Tabla 9)
- Un evaluador de restricción para evitar los tramos con altura insuficiente llamado RE_Altura (Tabla 10)

- Un evaluador de restricción para evitar los tramos con anchura insuficiente llamado RE_Anchura (Tabla 11)
- Un evaluador de restricción para evitar los tramos con presencia de escaleras llamado RE_Escaleras (Tabla 12)
- Un evaluador de restricción para evitar los tramos con iluminación inadecuada llamado RE_Iluminacion (Tabla 13)
- Un evaluador de restricción para evitar los tramos con pendiente superior al 12% RE_Pendiente, utilizando un parámetro para establecer el valor máximo y evaluando el valor de EV_Pendiente (Tabla 14)

Tabla 8: Evaluador de distancia de la red para usuario en silla de ruedas

Evaluador EV_Distancia (usuario en silla de ruedas)	
Evaluado por defecto	Si
Parameters	None
Usage	Cost
Units	Meters
Data type	Double
Source Type	Field
Source Value	Shape_Length
Default Values Type	Constant
Default Value	0

Tabla 9: Evaluador de pendiente de la red para usuario en silla de ruedas

Evaluador EV_Pendiente (usuario en silla de ruedas)	
Evaluado por defecto	No
Parameters	None
Usage	Cost
Units	Undefined
Data type	Double
Source Type	Field
Source Value	PENDIENTE
Default Values Type	Constant
Default Value	0

Tabla 10: Evaluador de restricción de altura de la red para usuario en silla de ruedas

Evaluador RE_Altura (usuario en silla de ruedas)	
Evaluado por defecto	Si
Parameters	None
Usage	Restriction
Units	Undefined
Data type	Boolean
Source Type	Field
Source Value	Expression (se evalúa el valor "ALTURA")
Pre-Logic VBscript	<pre>if [OBST_ALTURA] = "ALTURA" then ALTURA = 1</pre>
Default Values Type	Constant
Default Value	Transversable

Tabla 11: Evaluador de restricción de anchura de la red para usuario en silla de ruedas

Evaluador RE_Anchura (usuario en silla de ruedas)	
Evaluado por defecto	Si
Parameters	None
Usage	Restriction
Units	Undefined
Data type	Boolean
Source Type	Field
Source Value	Expression (se evalua el valor "ANCHURA")
Pre-Logic VBscript	<pre>if [OBST_ANCHURA] = "ANCHURA" then ANCHURA = 1</pre>
Default Values Type	Constant
Default Value	Transversable

Tabla 12: Evaluador de restricción de escaleras de la red para usuario en silla de ruedas

Evaluador RE_Escaleras (usuario en silla de ruedas)	
Evaluado por defecto	Si
Parameters	None
Usage	Restriction
Units	Undefined
Data type	Boolean
Source Type	Field
Source Value	Expression (se evalua el valor "ESCALERA")
Pre-Logic VBscript	<pre>if [OBST_ESCALERA] = "ESCALERA" then ESCALERA = 1</pre>
Default Values Type	Constant
Default Value	Transversable

Tabla 13: Evaluador de restricción de iluminación de la red para usuario en silla de ruedas

Evaluador RE_Iluminacion (usuario en silla de ruedas)	
Evaluado por defecto	Si
Parameters	None
Usage	Restriction
Units	Undefined
Data type	Boolean
Source Type	Field
Source Value	Expression (se evalua el valor "ILUMINACION")
Pre-Logic VBscript	<pre>if [ILUMINACION] <> "ILUMINACION SUFICIENTE" then ILUMINACION = 1</pre>
Default Values Type	Constant
Default Value	Transversable

Tabla 14: Evaluador de restricción de pendiente de la red para usuario en silla de ruedas

Evaluador RE_Pendiente (usuario en silla de ruedas)	
Evaluado por defecto	Si
Parameters	PendienteMax (Double, Default Value = 12)
Usage	Restriction
Units	Undefined
Data type	Boolean
Source Type	Field
Source Value	Function
Pre-Logic VBscript	<pre>EV_Pendiente > PendienteMax</pre>
Default Values Type	Constant
Default Value	Transversable

9 Obtención de los itinerarios accesibles

La extensión *Network Analyst* permite realizar cinco tipos de análisis:

- *Route*
- *Service Area*
- *Closest Facility*
- *OD Cost Matrix*
- *Vehicle Routing Problem*

Aunque existen muchos otros tipos de análisis en el estudio de redes (de Smith, Longley, & Goodchild, 2007) utilizaremos la funcionalidad de tres tipos de análisis: Análisis de rutas, generación de la matriz de costes origen-destino y centro más cercano.

9.1 Definición de los puntos de interés

Para evaluar las rutas se ha generado una capa de información con 20 puntos de interés (Figura 58), que corresponden a los puntos de origen y destino que se evaluarán en el análisis de redes para su salida en una página web.

Se asignado un identificador en forma de campo alfanumérico para identificar los puntos de interés con una letra de la “A” a la “T”.

Sin perjuicio de esto, el módulo es capaz de evaluar los itinerarios entre cualquier número de puntos arbitrarios, según cinco criterios:

- Visitando las paradas en un orden establecido (Figura 59)
- Visitando las paradas en el orden que permita recorrer la mínima distancia (Figura 59)
- Visitando las paradas en el orden que permita recorrer la mínima distancia pero manteniendo los puntos de origen y final
- Visitando las paradas en el orden que permita recorrer la mínima distancia pero manteniendo el punto de origen
- Visitando las paradas en el orden que permita recorrer la mínima distancia pero manteniendo el punto final

Figura 58: Puntos de interés evaluados en el análisis de redes



Figura 59: Ruta con múltiples destinos, siguiendo un orden establecido y optimizando la distancia



9.2 Obtención de rutas para usuarios estándar

El análisis de red se realiza sobre el *network dataset* creado anteriormente (Rutas_STD_ND), para el cual se han definido anteriormente todos los parámetros necesarios para poder efectuar la evaluación de rutas óptimas (detallado en el apartado 8.1, página 88).

En primer lugar es necesario utilizar la herramienta *Network Analyst Tools > Network Dataset > Build Network* para construir la topología de red.

Con esta acción la extensión *Network Analyst* genera una geometría a partir de los parámetros establecidos de manera que a cada segmento de red se le asignan valores en función de los evaluadores considerados:

- EV_Distancia: Coste de atravesar el tramo (se ha considerado el mismo coste en los dos sentidos) medido en metros
- RE_Altura: Consideración del tramo como transversable o no transversable (no se distinguen los dos sentidos) según su altura

9.2.1 Ruta entre múltiples puntos para usuarios estándar

Cuando la geometría está generada y sus valores asignados, se ha procedido a cargar en ArcMap el *network dataset* Rutas_STD_ND.

Con la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Make Route Layer* se ha creado una capa de análisis de redes de tipo ruta óptima con los siguientes parámetros:

- Nombramos a la capa de análisis “Ruta óptima (usuario estándar)”
- Como impedancia (elemento a minimizar) utilizamos EV_Distancia
- Como acumuladores elegimos EV_Distancia
- Permitimos al algoritmo efectuar cambios de sentido
- Elegimos como restricción RE_Altura

Con esta información se ha creado una capa de análisis que encontrará el recorrido con la mínima distancia entre puntos a visitar, evitando las zonas con altura insuficiente. Adicionalmente obtendremos la longitud total del recorrido óptimo.

Para añadir paradas a la ruta, se ha utilizado la herramienta *Create Network Location Tool* de la barra de herramientas de *Network Analyst* para incorporar puntos de interés (entidades tipo *stop*). Estos puntos no deben ser necesariamente los puntos de interés prefijados descritos anteriormente.

También se puede utilizar la misma herramienta para crear barreras (entidades tipo *barrier*) y así incorporar en la evaluación de la ruta información de elementos que impidan el paso de manera transitoria, como por ejemplo unas obras en la vía pública.

Se ha utilizado la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Solve* para obtener el itinerario óptimo correspondiente, pudiendo modificar los parámetros del análisis en la *Layer Properties* de la capa (por ejemplo el orden de las paradas).

9.2.2 Matriz origen-destino para usuarios estándar

Para saber las distancias de las rutas óptimas entre puntos de interés, se ha creado una capa de análisis tipo *OD Cost Matrix* mediante la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Make OD Matrix Cost Layer* con los siguientes parámetros:

- Nombramos a la capa de análisis “Matriz OD (usuario estándar)”
- Como impedancia (elemento a minimizar) utilizamos *EV_Distancia*
- Como acumuladores elegimos *EV_Distancia*
- Permitimos al algoritmo efectuar cambios de sentido
- Elegimos como restricción *RE_Altura*

Para definir los orígenes debemos incorporar la información de los puntos de interés a la capa de análisis mediante la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Add Locations* con los siguientes parámetros:

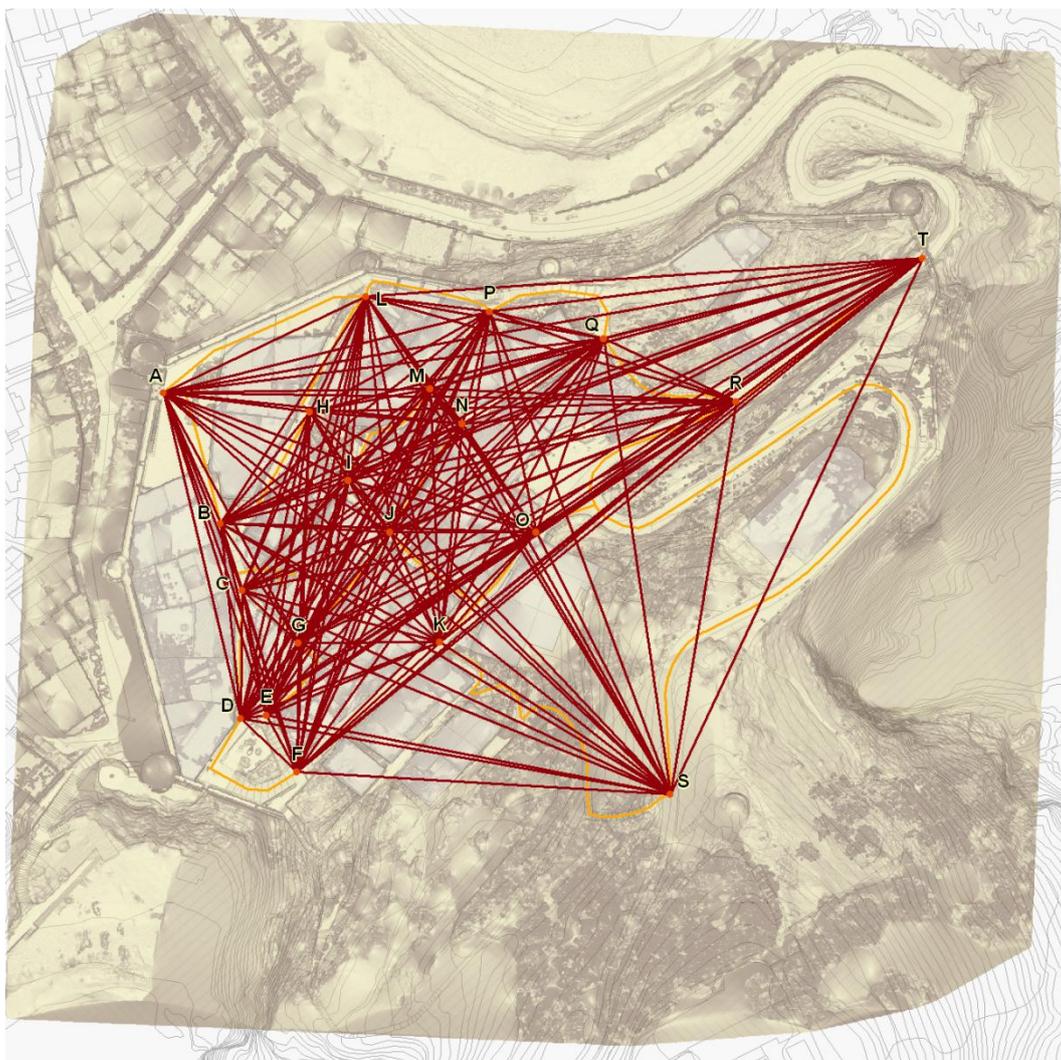
- Elegimos “Matriz OD (usuario estándar)” como *Input network analysis layer*
- Asignamos *Origins* como *Sub layer* de destino
- Elegimos nuestra capa “Puntos de interés” como *Input locations*
- Elegimos que la propiedad *Name* adquiera el valor del campo “NombrePunto” de la capa “Puntos de interés” en *Field Mappings*
- Forzamos a importar las entidades en orden seleccionando el campo “Nombre Punto” como *Sort Field*

Para definir los destinos debemos incorporar la información de los puntos de interés a la capa de análisis mediante la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Add Locations* con los siguientes parámetros:

- Elegimos “Matriz OD (usuario estándar)” como *Input network analysis layer*
- Asignamos *Destinations* como *Sub layer* de destino
- Elegimos nuestra capa “Puntos de interés” como *Input locations*
- Elegimos que la propiedad *Name* adquiera el valor del campo “NombrePunto” de la capa “Puntos de interés” en *Field Mappings*
- Forzamos a importar las entidades en orden seleccionando el campo “Nombre Punto” como *Sort Field*

Se ha utilizado la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Solve* para obtener la matriz origen-destino. El resultado es una capa con 400 entidades tipo línea que unen todos los puntos de interés posibles entre ellos (Figura 60). Para usuarios estándar, todos los puntos son accesibles.

Figura 60: Pares de puntos donde el itinerario para usuario estándar es posible



Los atributos de estas entidades tienen la estructura siguiente (Figura 61):

Figura 61: Listado de orígenes y destinos para usuario estándar (origen punto A)

Name	OriginID	DestinationID	DestinationRank	Total_EV_Distancia
A - A	1	1	1	0
A - B	1	2	2	30,71874458
A - C	1	3	3	44,63111445
A - D	1	4	4	59,91164465
A - E	1	5	5	59,96424825
A - F	1	6	6	70,01825883
A - G	1	7	7	75,08868066
A - H	1	8	8	75,47930067
A - I	1	9	9	86,98354013
A - J	1	10	10	87,83095496
A - K	1	11	11	88,24572631
A - L	1	12	12	100,9299486
A - M	1	13	13	110,2162764
A - N	1	14	14	120,2805713
A - O	1	15	15	120,9085702
A - P	1	16	16	129,0520454
A - Q	1	17	17	142,6015707
A - R	1	18	18	173,774891
A - S	1	19	19	197,8415113
A - T	1	20	20	220,0989242
...

Esta información se puede representar en una matriz cuadrada de dimensiones $n \times n$, simétrica y con ceros en la diagonal. Para obtenerla, en primer lugar se ha tenido que exportar la información a un archivo DBF mediante la herramienta *Conversion Tools > To dBASE > Table to dBASE*.

Una vez importada la información en Access con la orden *External data > Import > More > dBase File* hemos obtenido una tabla llamada OD_STD en nuestra base de datos.

Para obtener la matriz debemos crear una nueva consulta (Figura 62) con la orden *Create > Other > Query Design* que seleccionaremos que sea del tipo *Crosstab* a la que llamaremos OD_STD_Crosstab.

- El primer campo se le ha llamado “Origen_STD” y se le ha asignado la función *Group By Row Heading* y que adquiriera el valor de la primera letra de los registros del campo “Name”: *Left\$([OD_STD]![Name];1)*
- El segundo campo se le ha llamado “Destino_STD” y se le ha asignado la función *Group By Column Heading* y que adquiriera el valor de la última letra de los registros del campo “Name”: *Right\$([OD_STD]![Name];1)*
- El tercer campo es “Total_EV_Distancia” y se le ha asignado la función *First Value* de manera que obtiene el valor del campo “Total_EV_Distancia” (que es único)

Figura 62: Consulta SQL para generar la matriz OD para usuario estándar

```
TRANSFORM First(OD_STD.Total_EV_D) AS FirstOfTotal_EV_D
SELECT Left$([OD_STD]![Name],1) AS Origen_STD
FROM OD_STD
GROUP BY Left$([OD_STD]![Name],1)
PIVOT Right$([OD_STD]![Name],1);
```

Con estas operaciones se ha obtenido la matriz de distancias origen-destino para el usuario estándar y se le ha dado formato en Excel (Figura 63). Para ello se ha utilizado la opción *conditional formatting* aplicado a los valores de la matriz:

- Cells that contain a blank Gris claro
- Cell value = 0 Gris oscuro
- Todo el rango Gradación rojo-amarillo-azul

Figura 63: Matriz de distancias origen-destino para usuario estándar

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
A	0	28,06	41,93	66,13	66,83	79,41	56,13	28,93	40,23	52,25	73,26	44,16	52,35	58,99	78,17	66,05	87,03	112,29	127,22	151,24
B	28,06	0	13,91	38,83	39,02	51,46	28,27	28,08	26,53	33,32	49,06	53,19	48,96	51,43	61,99	67,46	83,58	103,93	103,28	147,33
C	41,93	13,91	0	25,38	25,17	37,56	15,27	37,60	30,10	31,20	40,10	62,97	54,21	54,34	58,79	73,49	86,62	103,77	93,20	148,69
D	66,13	38,83	25,38	0	5,07	15,24	18,74	62,04	51,57	47,05	41,78	86,98	74,93	72,71	68,57	94,15	103,45	115,53	85,55	161,68
E	66,83	39,02	25,17	5,07	0	12,74	15,58	60,48	49,09	43,54	36,87	85,04	71,97	69,26	64,00	91,05	99,55	110,97	80,74	157,16
F	79,41	51,46	37,56	15,24	12,74	0	25,54	71,23	58,57	50,89	38,01	95,03	80,10	76,20	66,69	98,68	104,75	113,09	73,43	159,31
G	56,13	28,27	15,27	18,74	15,58	25,54	0	45,70	33,59	28,31	27,62	69,78	56,40	53,97	51,41	75,53	84,84	98,12	78,78	144,03
H	28,93	28,08	37,60	62,04	60,48	71,23	45,70	0	15,52	28,45	52,17	25,43	24,10	30,09	50,43	40,60	59,48	83,62	103,52	123,99
I	40,23	26,53	30,10	51,57	49,09	58,57	33,59	15,52	0	13,03	36,66	36,53	24,12	25,02	38,23	43,44	57,36	77,55	88,52	120,82
J	52,25	33,32	31,20	47,05	43,54	50,89	28,31	28,45	13,03	0	23,90	46,78	29,29	25,72	28,69	47,82	56,73	72,58	75,60	117,62
K	73,26	49,06	40,10	41,78	36,87	38,01	27,62	52,17	36,66	23,90	0	69,86	50,06	43,47	28,78	66,17	68,12	75,11	54,32	121,36
L	44,16	53,19	62,97	86,98	85,04	95,03	69,78	25,43	36,53	46,78	69,86	0	22,21	31,42	57,35	24,40	47,27	75,36	115,06	109,32
M	52,35	48,96	54,21	74,93	71,97	80,10	56,40	24,10	24,12	29,29	50,06	22,21	0	9,29	35,15	19,35	35,46	59,98	92,89	99,94
N	58,99	51,43	54,34	72,71	69,26	76,20	53,97	30,09	25,02	25,72	43,47	31,42	9,29	0	25,95	22,84	32,39	53,77	83,85	95,94
O	78,17	61,99	58,79	68,57	64,00	66,69	51,41	50,43	38,23	28,69	28,78	57,35	35,15	25,95	0	44,69	40,59	46,97	58,03	93,17
P	66,05	67,46	73,49	94,15	91,05	98,68	75,53	40,60	43,44	47,82	66,17	24,40	19,35	22,84	44,69	0	22,95	51,41	101,83	85,47
Q	87,03	83,58	86,62	103,45	99,55	104,75	84,84	59,48	57,36	56,73	68,12	47,27	35,46	32,39	40,59	22,95	0	28,74	91,04	64,50
R	112,29	103,93	103,77	115,53	110,97	113,09	98,12	83,62	77,55	72,58	75,11	75,36	59,98	53,77	46,97	51,41	28,74	0	78,71	46,26
S	127,22	103,28	93,20	85,55	80,74	73,43	78,78	103,52	88,52	75,60	54,32	115,06	92,89	83,85	58,03	101,83	91,04	78,71	0	116,91
T	151,24	147,33	148,69	161,68	157,16	159,31	144,03	123,99	120,82	117,62	121,36	109,32	99,94	95,94	93,17	85,47	64,50	46,26	116,91	0

Con la información de esta matriz se pueden descartar las distancias excesivas si se creyera necesario.

9.2.3 Rutas posibles para usuarios estándar

Desafortunadamente, las entidades generadas son líneas rectas entre los puntos y no itinerarios reales, por lo que es necesario un paso adicional para poder obtener gráficamente todas las rutas posibles para su utilización en la web.

Para conseguirlo, debemos utilizar una capa de análisis tipo *closest facility* de una manera distinta a como está diseñada para aprovechar que el análisis *closest facility* genera los itinerarios con su geometría real a diferencia del *OD Cost Matrix*.

Como conocemos el número de puntos de interés (en este caso 20) se han podido obtener las rutas creando en primer lugar una capa de análisis tipo *Closest Facility* mediante la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Make Closest Facility Layer* con los siguientes parámetros:

- Nombramos a la capa de análisis “Centro más cercano (usuario estándar)”
- Como impedancia (elemento a minimizar) utilizamos EV_Distancia
- Como *facilities to find* introducimos 20 (el número total)
- Como acumuladores elegimos EV_Distancia
- Permitimos al algoritmo efectuar cambios de sentido
- Elegimos como restricción RE_Altura

Para definir los orígenes debemos incorporar la información de los puntos de interés a la capa de análisis mediante la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Add Locations* con los siguientes parámetros:

- Elegimos “Centro más cercano (usuario estándar)” como *Input network analysis layer*
- Asignamos *Facilities* como *Sub layer* de destino
- Elegimos nuestra capa “Puntos de interés” como *Input locations*
- Elegimos que la propiedad *Name* adquiera el valor del campo “NombrePunto” de la capa “Puntos de interés” en *Field Mappings*
- Forzamos a importar las entidades en orden seleccionando el campo “Nombre Punto” como *Sort Field*

Para definir los destinos debemos incorporar la información de los puntos de interés a la capa de análisis mediante la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Add Locations* con los siguientes parámetros:

- Elegimos “Centro más cercano (usuario estándar)” como *Input network analysis layer*
- Asignamos *Incidents* como *Sub layer* de destino
- Elegimos nuestra capa “Puntos de interés” como *Input locations*
- Elegimos que la propiedad *Name* adquiera el valor del campo “NombrePunto” de la capa “Puntos de interés” en *Field Mappings*
- Forzamos a importar las entidades en orden seleccionando el campo “Nombre Punto” como *Sort Field*

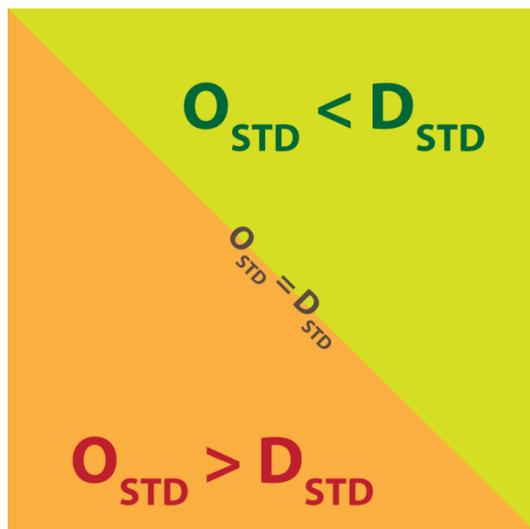
Se ha utilizado la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Solve* para obtener la totalidad de las rutas posibles. El resultado es una capa con 400 entidades tipo polilínea que unen todos los puntos de interés posibles entre ellos y cuyos atributos tienen la estructura siguiente (Figura 64):

Figura 64: Listado de facilities e incidents para usuario estándar (origen punto A)

Name	FacilityID	IncidentID	FacilityRank	Total_EV_Distancia
A - A	1	1	1	0
A - B	2	1	2	30,71874458
A - C	3	1	3	44,63111445
A - D	4	1	4	59,91164465
A - E	5	1	5	59,96424825
A - F	6	1	6	70,01825883
A - G	7	1	7	75,08868066
A - H	8	1	8	75,47930067
A - I	9	1	9	86,98354013
A - J	10	1	10	87,83095496
A - K	11	1	11	88,24572631
A - L	12	1	12	100,9299486
A - M	13	1	13	110,2162764
A - N	14	1	14	120,2805713
A - O	15	1	15	120,9085702
A - P	16	1	16	129,0520454
A - Q	17	1	17	142,6015707
A - R	18	1	18	173,774891
A - S	19	1	19	197,8415113
A - T	20	1	20	220,0989242
...

Para eliminar los duplicados (consideramos una misma ruta independientemente del sentido de circulación) debemos realizar una consulta con la herramienta *Selection > Select by Attributes*. Debemos seleccionar los elementos de la capa de rutas de “Centro más cercano (usuario estándar)” que cumplan *FacilityID > IncidentID* (Figura 65).

Figura 65: Rutas duplicadas en la matriz origen-destino (usuario estándar)



Con esta operación eliminaremos los itinerarios duplicados o con origen y destino en el mismo punto y nos quedaremos únicamente con un total de 190 rutas (Ecuación 6): 19 rutas partiendo de A, 18 rutas partiendo de B y así sucesivamente hasta n-1.

Ecuación 6: Rutas descartando duplicados y origen=destino (usuario estándar)

$$\frac{\text{rutas posibles} - \text{número de puntos posibles}}{2} = \frac{20^2 - 20}{2} = 190$$

Finalmente, para generar las rutas se ha utilizado la extensión *Zoom and Export 2.3*²² de Ken Buja, utilizando las siguientes opciones:

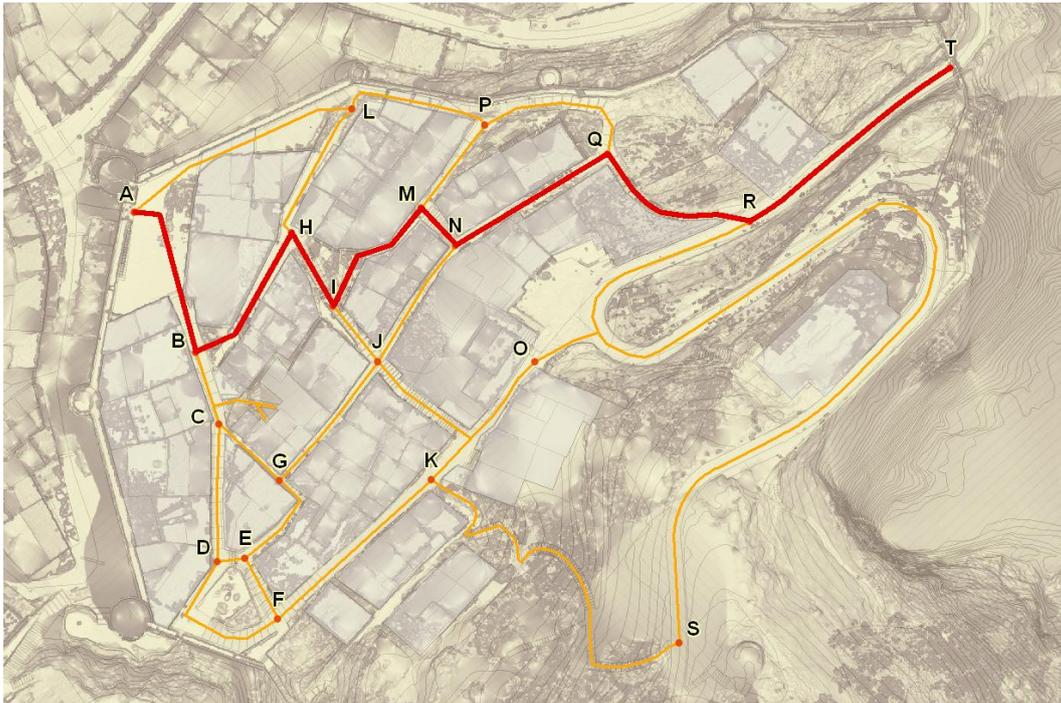
- Definimos un *dataframe* limitando su extensión para que todas las imágenes aparezcan idénticas en la página web.
- Seleccionamos la capa que queremos exportar como imagen, en nuestro caso, la capa creada anteriormente una vez eliminados los duplicados.
- Elegimos el campo “Name” como nombre del archivo a crear.
- Seleccionamos *Do not zoom to feature*.

²² Disponible de forma gratuita en <http://arcscripts.esri.com/details.asp?dbid=15395>

- Elegimos la opción *Show only zoomed feature*.
- Elegimos el formato de salida (PNG) y la carpeta de destino.

El resultado es un conjunto de 190 PNG con nombres del tipo “STD_A–T.png” listos para ser incorporados a la web²³ para su difusión (Figura 66).

Figura 66: Imagen del itinerario A-T para usuarios estándar exportada para la web



²³ Véase <http://www-cpsv.upc.es/PATRAC/>

9.3 Obtención de rutas para usuarios con movilidad reducida

El análisis de red se realiza sobre el *network dataset* creado anteriormente (Rutas_MR_ND), para el cual se han definido anteriormente todos los parámetros necesarios para poder efectuar la evaluación de rutas óptimas (detallado en el apartado 8.2, página 90).

En primer lugar es necesario utilizar la herramienta *Network Analyst Tools > Network Dataset > Build Network* para construir la topología de red.

Con esta acción la extensión *Network Analyst* genera una geometría a partir de los parámetros establecidos de manera que a cada segmento de red se le asignan valores en función de los evaluadores considerados:

- EV_Distancia: Coste de atravesar el tramo (se ha considerado el mismo coste en los dos sentidos) medido en metros
- RE_Altura: Consideración del tramo como transversable o no transversable (no se distinguen los dos sentidos) según su altura
- RE_Anchura: Consideración del tramo como transversable o no transversable (no se distinguen los dos sentidos) según su anchura
- RE_Escaleras: Consideración del tramo como transversable o no transversable (no se distinguen los dos sentidos) en función de la presencia de escaleras
- RE_Iluminación: Consideración del tramo como transversable o no transversable (no se distinguen los dos sentidos) en función del grado de iluminación

9.3.1 Ruta entre múltiples puntos para usuarios con movilidad reducida

Cuando la geometría está generada y sus valores asignados, se ha procedido a cargar en ArcMap el *network dataset* Rutas_MR_ND.

Con la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Make Route Layer* se ha creado una capa de análisis de redes de tipo ruta óptima con los siguientes parámetros:

- Nombramos a la capa de análisis “Ruta óptima (usuario con movilidad reducida)”
- Como impedancia (elemento a minimizar) utilizamos EV_Distancia
- Como acumuladores elegimos EV_Distancia
- Permitimos al algoritmo efectuar cambios de sentido
- Elegimos como restricciones RE_Altura, RE_Anchura, RE_Escaleras y RE_Iluminacion

Con esta información se ha creado una capa de análisis que encontrará el recorrido con la mínima distancia entre puntos a visitar, evitando las zonas con altura insuficiente, anchura insuficiente, presencia de escalones e iluminación insuficiente. Adicionalmente obtendremos la longitud total del recorrido óptimo.

Para añadir paradas a la ruta, se ha utilizado la herramienta *Create Network Location Tool* de la barra de herramientas de *Network Analyst* para incorporar puntos de interés (entidades tipo *stop*). Estos puntos no deben ser necesariamente los puntos de interés prefijados descritos anteriormente.

También se puede utilizar la misma herramienta para crear barreras (entidades tipo *barrier*) y así incorporar en la evaluación de la ruta información de elementos que impidan el paso de manera transitoria, como por ejemplo unas obras en la vía pública.

Se ha utilizado la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Solve* para obtener el itinerario óptimo correspondiente, pudiendo modificar los parámetros del análisis en la *Layer Properties* de la capa (por ejemplo el orden de las paradas).

9.3.2 Matriz origen-destino para usuarios con movilidad reducida

Para saber las distancias de las rutas óptimas entre puntos de interés, se ha creado una capa de análisis tipo *OD Cost Matrix* mediante la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Make OD Matrix Cost Layer* con los siguientes parámetros:

- Nombramos a la capa de análisis “Matriz OD (usuario con movilidad reducida)”
- Como impedancia (elemento a minimizar) utilizamos EV_Distancia
- Como acumuladores elegimos EV_Distancia
- Permitimos al algoritmo efectuar cambios de sentido
- Elegimos como restricciones RE_Altura, RE_Anchura, RE_Escaleras y RE_Iluminacion

Para definir los orígenes debemos incorporar la información de los puntos de interés a la capa de análisis mediante la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Add Locations* con los siguientes parámetros:

- Elegimos “Matriz OD (usuario con movilidad reducida)” como *Input network analysis layer*
- Asignamos *Origins* como *Sub layer* de destino
- Elegimos nuestra capa “Puntos de interés” como *Input locations*
- Elegimos que la propiedad *Name* adquiera el valor del campo “NombrePunto” de la capa “Puntos de interés” en *Field Mappings*
- Forzamos a importar las entidades en orden seleccionando el campo “Nombre Punto” como *Sort Field*

Para definir los destinos debemos incorporar la información de los puntos de interés a la capa de análisis mediante la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Add Locations* con los siguientes parámetros:

- Elegimos “Matriz OD (usuario con movilidad reducida)” como *Input network analysis layer*
- Asignamos *Destinations* como *Sub layer* de destino
- Elegimos nuestra capa “Puntos de interés” como *Input locations*
- Elegimos que la propiedad *Name* adquiera el valor del campo “NombrePunto” de la capa “Puntos de interés” en *Field Mappings*

- Forzamos a importar las entidades en orden seleccionando el campo “Nombre Punto” como *Sort Field*

Se ha utilizado la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Solve* para obtener la matriz origen-destino. El resultado es una capa con 88 entidades tipo línea que unen todos los puntos de interés posibles entre ellos (Figura 67). Este gráfico permite identificar *clusters* de puntos de interés donde la movilidad es posible. Se evalúan negativamente 312 pares (78% de los pares).

Figura 67: Pares de puntos donde el itinerario para usuario con movilidad reducida es posible



Los atributos de estas entidades tienen la estructura siguiente (Figura 68):

Figura 68: Listado de orígenes y destinos para usuario con movilidad reducida (origen punto A)

Name	OriginID	DestinationID	DestinationRank	Total_EV_Distancia
A - A	1	1	1	0
A - B	1	2	2	30,7187445791
A - H	1	8	3	59,9642482466
A - L	1	12	4	86,9835401317
...

Esta información se puede representar en una matriz cuadrada de dimensiones $n \times n$, simétrica y con ceros en la diagonal. Para obtenerla, en primer lugar se ha tenido que exportar la información a un archivo DBF mediante la herramienta *Conversion Tools > To dBASE > Table to dBASE*.

Una vez importada la información en Access con la orden *External data > Import > More > dBase File* hemos obtenido una tabla llamada OD_MR en nuestra base de datos.

Para obtener la matriz debemos crear una nueva consulta (Figura 69) con la orden *Create > Other > Query Design* que seleccionaremos que sea del tipo *Crosstab* a la que llamaremos OD_MR_Crosstab.

- El primer campo se le ha llamado “Origen_MR” y se le ha asignado la función *Group By Row Heading* y que adquiera el valor de la primera letra de los registros del campo “Name”: *Left\$([OD_MR]![Name];1)*
- El segundo campo se le ha llamado “Destino_MR” y se le ha asignado la función *Group By Column Heading* y que adquiera el valor de la última letra de los registros del campo “Name”: *Right\$([OD_MR]![Name];1)*
- El tercer campo es “Total_EV_Distancia” y se le ha asignado la función *First Value* de manera que obtiene el valor del campo “Total_EV_Distancia” (que es único)

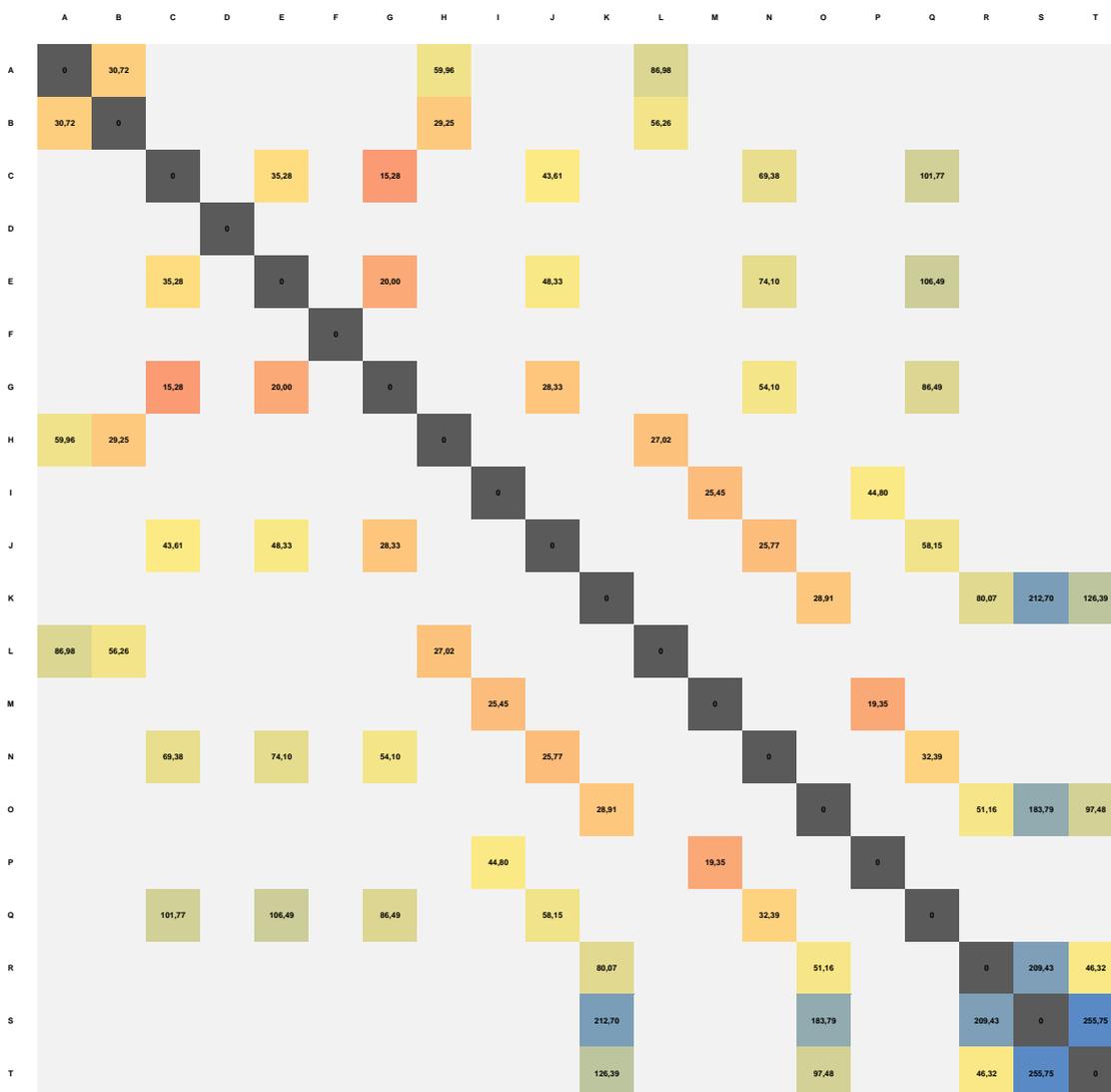
Figura 69: Consulta SQL para generar la matriz OD para usuario con movilidad reducida

```
TRANSFORM First(OD_MR.Total_EV_D) AS FirstOfTotal_EV_D
SELECT Left$([OD_MR]![Name],1) AS Origen_MR
FROM OD_MR
GROUP BY Left$([OD_MR]![Name],1)
PIVOT Right$([OD_MR]![Name],1);
```

Con estas operaciones se ha obtenido la matriz de distancias origen-destino para el usuario estándar y se le ha dado formato en Excel (Figura 70). Para ello se ha utilizado la opción *conditional formatting* aplicado a los valores de matriz:

- Cells that contain a blank Gris claro
- Cell value = 0 Gris oscuro
- Todo el rango Gradación rojo-amarillo-azul

Figura 70: Matriz de distancias origen-destino para usuario con movilidad reducida



Con la información de esta matriz se pueden descartar las distancias excesivas si se creyera necesario.

9.3.3 Rutas posibles para usuarios con movilidad reducida

Desafortunadamente, las entidades generadas son líneas rectas entre los puntos y no itinerarios reales, por lo que es necesario un paso adicional para poder obtener gráficamente todas las rutas posibles para su utilización en la web.

Para conseguirlo, debemos utilizar una capa de análisis tipo *closest facility* de una manera distinta a como está diseñada para aprovechar que el análisis *closest facility* genera los itinerarios con su geometría real a diferencia del *OD Cost Matrix*.

Como conocemos el número de puntos de interés (en este caso 20) se han podido obtener las rutas creando en primer lugar una capa de análisis tipo *Closest Facility* mediante la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Make Closest Facility Layer* con los siguientes parámetros:

- Nombramos a la capa de análisis “Centro más cercano (usuario con movilidad reducida)”
- Como impedancia (elemento a minimizar) utilizamos EV_Distancia
- Como *facilities to find* introducimos 20 (el número total)
- Como acumuladores elegimos EV_Distancia
- Permitimos al algoritmo efectuar cambios de sentido
- Elegimos como restricciones RE_Altura, RE_Anchura, RE_Escaleras y RE_Iluminacion

Para definir los orígenes debemos incorporar la información de los puntos de interés a la capa de análisis mediante la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Add Locations* con los siguientes parámetros:

- Elegimos “Centro más cercano (usuario con movilidad reducida)” como *Input network analysis layer*
- Asignamos *Facilities* como *Sub layer* de destino
- Elegimos nuestra capa “Puntos de interés” como *Input locations*
- Elegimos que la propiedad *Name* adquiera el valor del campo “NombrePunto” de la capa “Puntos de interés” en *Field Mappings*
- Forzamos a importar las entidades en orden seleccionando el campo “Nombre Punto” como *Sort Field*

Para definir los destinos debemos incorporar la información de los puntos de interés a la capa de análisis mediante la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Add Locations* con los siguientes parámetros:

- Elegimos “Centro más cercano (usuario con movilidad reducida)” como *Input network analysis layer*
- Asignamos *Incidents* como *Sub layer* de destino
- Elegimos nuestra capa “Puntos de interés” como *Input locations*
- Elegimos que la propiedad *Name* adquiera el valor del campo “NombrePunto” de la capa “Puntos de interés” en *Field Mappings*
- Forzamos a importar las entidades en orden seleccionando el campo “Nombre Punto” como *Sort Field*

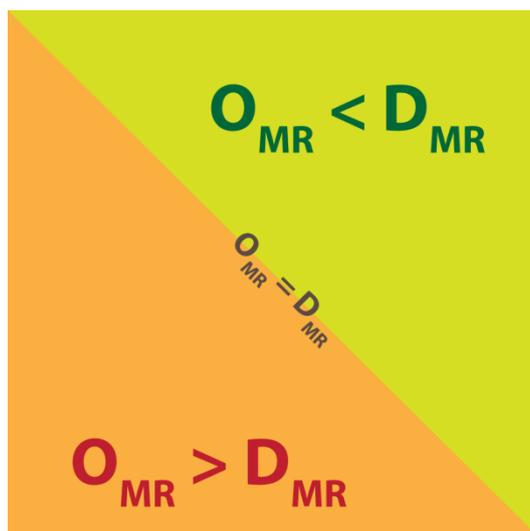
Se ha utilizado la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Solve* para obtener la totalidad de las rutas posibles. El resultado es una capa con 88 entidades tipo polilínea que unen todos los puntos de interés posibles entre ellos y cuyos atributos tienen la estructura siguiente (Figura 71):

Figura 71: Listado de facilities e incidents para usuario con movilidad reducida (origen punto A)

Name	FacilityID	IncidentID	FacilityRank	Total_EV_Distancia
A - A	1	1	1	0
A - B	2	1	2	30,7187445791
A - H	8	1	3	59,9642482466
A - L	12	1	4	86,9835401317
...

Para eliminar los duplicados (consideramos una misma ruta independientemente del sentido de circulación) debemos realizar una consulta con la herramienta *Selection > Select by Attributes*. Debemos seleccionar los elementos de la capa de rutas de “Centro más cercano (usuario estándar)” que cumplan *FacilityID > IncidentID* (Figura 72).

Figura 72: Rutas duplicadas en la matriz origen-destino (usuario con movilidad reducida)



Con esta operación eliminaremos los itinerarios duplicados o con origen y destino en el mismo punto y nos quedaremos únicamente con un total de 34 rutas (Ecuación 7).

Ecuación 7: Rutas descartando duplicados y origen=destino (usuario con movilidad reducida)

$$\frac{\text{rutas posibles} - \text{número de puntos posibles}}{2} = \frac{88 - 20}{2} = 34$$

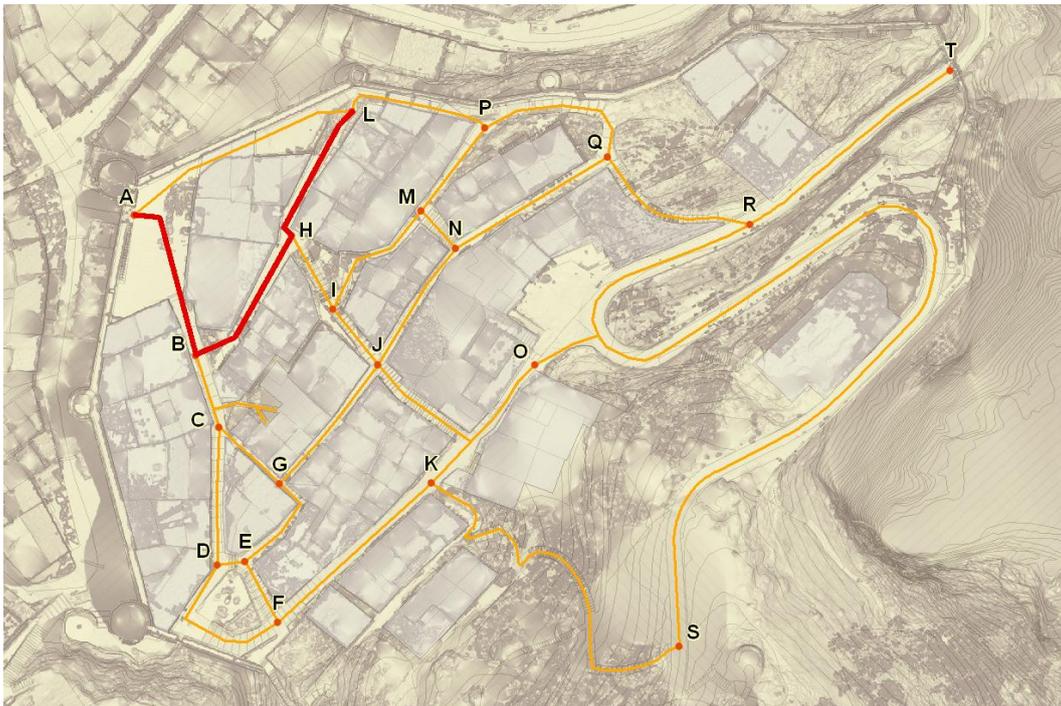
Finalmente, para generar las rutas se ha utilizado la extensión *Zoom and Export 2.3*²⁴ de Ken Buja, utilizando las siguientes opciones:

- Definimos un *dataframe* limitando su extensión para que todas las imágenes aparezcan idénticas en la página web.
- Seleccionamos la capa que queremos exportar como imagen, en nuestro caso, la capa creada anteriormente una vez eliminados los duplicados.
- Elegimos el campo "Name" como nombre del archivo a crear.
- Seleccionamos *Do not zoom to feature*.
- Elegimos la opción *Show only zoomed feature*.
- Elegimos el formato de salida (PNG) y la carpeta de destino.

El resultado es un conjunto de 34 PNG con nombres del tipo "MR_A-L.png" listos para ser incorporados a la web²⁵ para su difusión (Figura 73).

²⁴ Disponible de forma gratuita en <http://arcscripts.esri.com/details.asp?dbid=15395>

Figura 73: Imagen del itinerario A-L para usuarios con movilidad reducida exportada para la web



²⁵ Véase <http://www-cpsv.upc.es/PATRAC/>

9.4 Obtención de rutas para usuarios en silla de ruedas

El análisis de red se realiza sobre el *network dataset* creado anteriormente (Rutas_SR_ND), para el cual se han definido anteriormente todos los parámetros necesarios para poder efectuar la evaluación de rutas óptimas (detallado en el apartado 8.3, página 94).

En primer lugar es necesario utilizar la herramienta *Network Analyst Tools > Network Dataset > Build Network* para construir la topología de red.

Con esta acción la extensión *Network Analyst* genera una geometría a partir de los parámetros establecidos de manera que a cada segmento de red se le asignan valores en función de los evaluadores considerados:

- EV_Distancia: Coste de atravesar el tramo (se ha considerado el mismo coste en los dos sentidos) medido en metros
- EV_Pendiente: Evaluador del coste de atravesar el tramo (se ha considerado el mismo coste en los dos sentidos) en función de la pendiente. Se utiliza para calcular la restricción de pendiente (RE_Pendiente)
- RE_Altura: Consideración del tramo como transversable o no transversable (no se distinguen los dos sentidos) según su altura
- RE_Anchura: Consideración del tramo como transversable o no transversable (no se distinguen los dos sentidos) según su anchura
- RE_Escaleras: Consideración del tramo como transversable o no transversable (no se distinguen los dos sentidos) en función de la presencia de escaleras
- RE_Iluminacion: Consideración del tramo como transversable o no transversable (no se distinguen los dos sentidos) en función del grado de iluminación
- RE_Pendiente: Consideración del tramo como transversable o no transversable (no se distinguen los dos sentidos) en función de la pendiente menor o mayor del 12%

9.4.1 Ruta entre múltiples puntos para usuarios en silla de ruedas

Cuando la geometría está generada y sus valores asignados, se ha procedido a cargar en ArcMap el *network dataset* Rutas_SR_ND.

Con la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Make Route Layer* se ha creado una capa de análisis de redes de tipo ruta óptima con los siguientes parámetros:

- Nombramos a la capa de análisis “Ruta óptima (usuario en silla de ruedas)”
- Como impedancia (elemento a minimizar) utilizamos EV_Distancia
- Como acumuladores elegimos EV_Distancia
- Permitimos al algoritmo efectuar cambios de sentido
- Elegimos como restricciones RE_Altura, RE_Anchura, RE_Escaleras, RE_Iluminacion y RE_Pendiente

Con esta información se ha creado una capa de análisis que encontrará el recorrido con la mínima distancia entre puntos a visitar, evitando las zonas con altura insuficiente, anchura insuficiente, presencia de escalones, iluminación insuficiente y pendiente excesiva. Adicionalmente obtendremos la longitud total del recorrido óptimo.

Para añadir paradas a la ruta, se ha utilizado la herramienta *Create Network Location Tool* de la barra de herramientas de *Network Analyst* para incorporar puntos de interés (entidades tipo *stop*). Estos puntos no deben ser necesariamente los puntos de interés prefijados descritos anteriormente.

También se puede utilizar la misma herramienta para crear barreras (entidades tipo *barrier*) y así incorporar en la evaluación de la ruta información de elementos que impidan el paso de manera transitoria, como por ejemplo unas obras en la vía pública.

Se ha utilizado la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Solve* para obtener el itinerario óptimo correspondiente, pudiendo modificar los parámetros del análisis en la *Layer Properties* de la capa (por ejemplo el orden de las paradas).

9.4.2 Matriz origen-destino para usuarios en silla de ruedas

Para saber las distancias de las rutas óptimas entre puntos de interés, se ha creado una capa de análisis tipo *OD Cost Matrix* mediante la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Make OD Matrix Cost Layer* con los siguientes parámetros:

- Nombramos a la capa de análisis “Matriz OD (usuario en silla de ruedas)”
- Como impedancia (elemento a minimizar) utilizamos EV_Distancia
- Como acumuladores elegimos EV_Distancia
- Permitimos al algoritmo efectuar cambios de sentido
- Elegimos como restricciones RE_Altura, RE_Anchura, RE_Escaleras, RE_Iluminacion y RE_Pendiente

Para definir los orígenes debemos incorporar la información de los puntos de interés a la capa de análisis mediante la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Add Locations* con los siguientes parámetros:

- Elegimos “Matriz OD (usuario en silla de ruedas)” como *Input network analysis layer*
- Asignamos *Origins* como *Sub layer* de destino
- Elegimos nuestra capa “Puntos de interés” como *Input locations*
- Elegimos que la propiedad *Name* adquiera el valor del campo “NombrePunto” de la capa “Puntos de interés” en *Field Mappings*
- Forzamos a importar las entidades en orden seleccionando el campo “Nombre Punto” como *Sort Field*

Para definir los destinos debemos incorporar la información de los puntos de interés a la capa de análisis mediante la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Add Locations* con los siguientes parámetros:

- Elegimos “Matriz OD (usuario en silla de ruedas)” como *Input network analysis layer*
- Asignamos *Destinations* como *Sub layer* de destino
- Elegimos nuestra capa “Puntos de interés” como *Input locations*
- Elegimos que la propiedad *Name* adquiera el valor del campo “NombrePunto” de la capa “Puntos de interés” en *Field Mappings*

- Forzamos a importar las entidades en orden seleccionando el campo “Nombre Punto” como *Sort Field*

Se ha utilizado la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Solve* para obtener la matriz origen-destino. El resultado es una capa con 19 entidades tipo línea que unen todos los puntos de interés posibles entre ellos (Figura 74). Este gráfico permite identificar *clusters* de puntos de interés donde la movilidad es posible. Se evalúan negativamente 381 pares (95% de los pares).

Figura 74: Pares de puntos donde el itinerario para usuario en silla de ruedas es posible



Los atributos de estas entidades tienen la estructura siguiente (Figura 75):

Figura 75: Listado de orígenes y destinos para usuario en silla de ruedas (origen punto A)

Name	OriginID	DestinationID	DestinationRank	Total_EV_Distancia
A - A	1	1	1	0
A - B	1	2	2	30,7187445791
...

Esta información se puede representar en una matriz cuadrada de dimensiones n x n, simétrica y con ceros en la diagonal. Para obtenerla, en primer lugar se ha tenido que exportar la información a un archivo DBF mediante la herramienta *Conversion Tools > To dBASE > Table to dBASE*.

Una vez importada la información en Access con la orden *External data > Import > More > dBase File* hemos obtenido una tabla llamada OD_SR en nuestra base de datos.

Para obtener la matriz debemos crear una nueva consulta (Figura 76) con la orden *Create > Other > Query Design* que seleccionaremos que sea del tipo *Crosstab* a la que llamaremos OD_SR_Crosstab.

- El primer campo se le ha llamado “Origen_SR” y se le ha asignado la función *Group By Row Heading* y que adquiera el valor de la primera letra de los registros del campo “Name”: *Left\$([OD_SR]![Name];1)*
- El segundo campo se le ha llamado “Destino_SR” y se le ha asignado la función *Group By Column Heading* y que adquiera el valor de la última letra de los registros del campo “Name”: *Right\$([OD_SR]![Name];1)*
- El tercer campo es “Total_EV_Distancia” y se le ha asignado la función *First Value* de manera que obtiene el valor del campo “Total_EV_Distancia” (que es único)

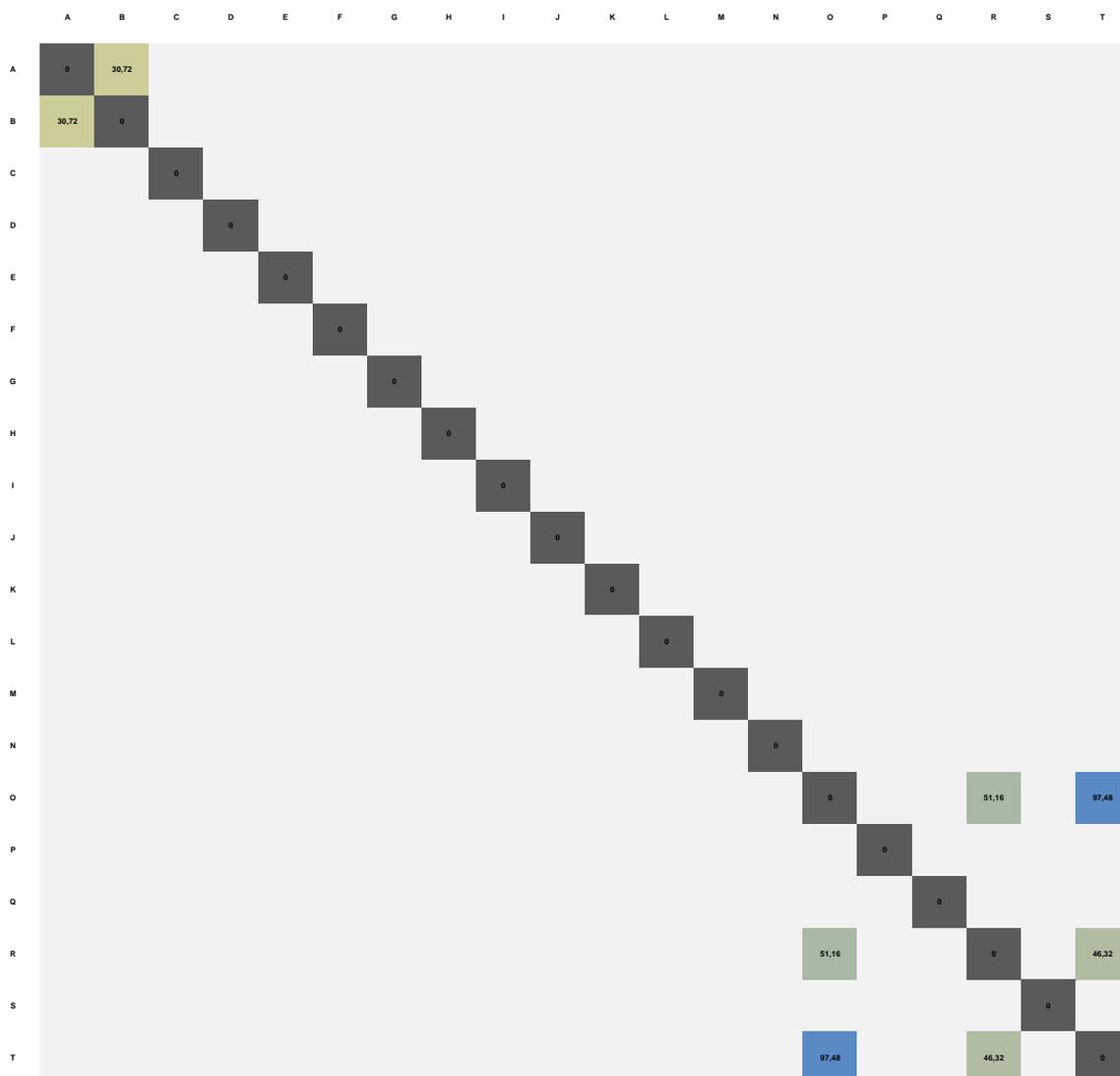
Figura 76: Consulta SQL para generar la matriz OD para usuario con movilidad reducida

```
TRANSFORM First(OD_SR.Total_EV_D) AS FirstOfTotal_EV_D
SELECT Left$([OD_SR]![Name],1) AS Origen_SR
FROM OD_SR
GROUP BY Left$([OD_SR]![Name],1)
PIVOT Right$([OD_SR]![Name],1);
```

Con estas operaciones se ha obtenido la matriz de distancias origen-destino para el usuario estándar y se le ha dado formato en Excel (Figura 77). Para ello se ha utilizado la opción *conditional formatting* aplicado a los valores de matriz:

- Cells that contain a blank Gris claro
- Cell value = 0 Gris oscuro
- Todo el rango Gradación rojo-amarillo-azul

Figura 77: Matriz de distancias origen-destino para usuario en silla de ruedas



Con la información de esta matriz se pueden descartar las distancias excesivas si se creyera necesario.

9.4.3 Rutas posibles para usuarios en silla de ruedas

Desafortunadamente, las entidades generadas son líneas rectas entre los puntos y no itinerarios reales, por lo que es necesario un paso adicional para poder obtener gráficamente todas las rutas posibles para su utilización en la web.

Para conseguirlo, debemos utilizar una capa de análisis tipo *closest facility* de una manera distinta a como está diseñada para aprovechar que el análisis *closest facility* genera los itinerarios con su geometría real a diferencia del *OD Cost Matrix*.

Como conocemos el número de puntos de interés (en este caso 20) se han podido obtener las rutas creando en primer lugar una capa de análisis tipo *Closest Facility* mediante la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Make Closest Facility Layer* con los siguientes parámetros:

- Nombramos a la capa de análisis “Centro más cercano (usuario en silla de ruedas)”
- Como impedancia (elemento a minimizar) utilizamos EV_Distancia
- Como *facilities to find* introducimos 20 (el número total)
- Como acumuladores elegimos EV_Distancia
- Permitimos al algoritmo efectuar cambios de sentido
- Elegimos como restricciones RE_Altura, RE_Anchura, RE_Escaleras, RE_Iluminacion y RE_Pendiente

Para definir los orígenes debemos incorporar la información de los puntos de interés a la capa de análisis mediante la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Add Locations* con los siguientes parámetros:

- Elegimos “Centro más cercano (usuario en silla de ruedas)” como *Input network analysis layer*
- Asignamos *Facilities* como *Sub layer* de destino
- Elegimos nuestra capa “Puntos de interés” como *Input locations*
- Elegimos que la propiedad *Name* adquiera el valor del campo “NombrePunto” de la capa “Puntos de interés” en *Field Mappings*
- Forzamos a importar las entidades en orden seleccionando el campo “Nombre Punto” como *Sort Field*

Para definir los destinos debemos incorporar la información de los puntos de interés a la capa de análisis mediante la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Add Locations* con los siguientes parámetros:

- Elegimos “Centro más cercano (usuario en silla de ruedas)” como *Input network analysis layer*
- Asignamos *Incidents* como *Sub layer* de destino
- Elegimos nuestra capa “Puntos de interés” como *Input locations*
- Elegimos que la propiedad *Name* adquiera el valor del campo “NombrePunto” de la capa “Puntos de interés” en *Field Mappings*
- Forzamos a importar las entidades en orden seleccionando el campo “Nombre Punto” como *Sort Field*

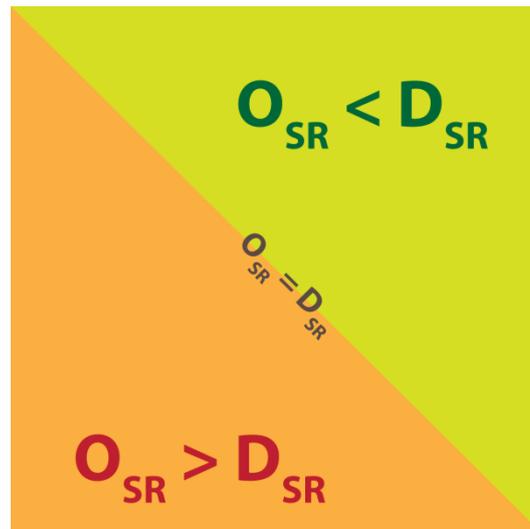
Se ha utilizado la herramienta *Network Analyst Tools > Analysis > Solve* para obtener la totalidad de las rutas posibles. El resultado es una capa con 19 entidades tipo polilínea que unen todos los puntos de interés posibles entre ellos y cuyos atributos tienen la estructura siguiente (Figura 78):

Figura 78: Listado de facilities e incidents para usuario en silla de ruedas (origen punto A)

Name	FacilityID	IncidentID	FacilityRank	Total_EV_Distancia
A - A	1	1	1	0
A - B	2	1	2	30,7187445791
...

Para eliminar los duplicados (consideramos una misma ruta independientemente del sentido de circulación) debemos realizar una consulta con la herramienta *Selection > Select by Attributes*. Debemos seleccionar los elementos de la capa de rutas de “Centro más cercano (usuario estándar)” que cumplan *FacilityID > IncidentID* (Figura 79).

Figura 79: Rutas duplicadas en la matriz origen-destino (usuario con movilidad reducida)



Con esta operación eliminaremos los itinerarios duplicados o con origen y destino en el mismo punto y nos quedaremos únicamente con un total de 4 rutas (Ecuación 8).

Ecuación 8: Rutas descartando duplicados y origen=destino (usuario en silla de ruedas)

$$\frac{\text{rutas posibles} - \text{número de puntos posibles}}{2} = \frac{19 - 11}{2} = 4$$

Finalmente, para generar las rutas se ha utilizado la extensión *Zoom and Export 2.3*²⁶ de Ken Buja, utilizando las siguientes opciones:

- Definimos un *dataframe* limitando su extensión para que todas las imágenes aparezcan idénticas en la página web.
- Seleccionamos la capa que queremos exportar como imagen, en nuestro caso, la capa creada anteriormente una vez eliminados los duplicados.
- Elegimos el campo "Name" como nombre del archivo a crear.
- Seleccionamos *Do not zoom to feature*.
- Elegimos la opción *Show only zoomed feature*.
- Elegimos el formato de salida (PNG) y la carpeta de destino.

El resultado es un conjunto de 4 PNG con nombres del tipo "SR_A-B.png" listos para ser incorporados a la web²⁷ para su difusión (Figura 80).

²⁶ Disponible de forma gratuita en <http://arcscripts.esri.com/details.asp?dbid=15395>

Figura 80: Imagen del itinerario A-B para usuarios en silla de ruedas exportada para la web



²⁷ Véase <http://www-cpsv.upc.es/PATRAC/>

10 Conclusiones

La evaluación de la accesibilidad en entornos urbanos que aborda esta tesis sólo tiene sentido si podemos obtener resultados y si los resultados obtenidos nos permiten identificar en qué aspectos debemos incidir para mejorarla.

El aprovechamiento de las herramientas generalistas disponibles para el estudio de la movilidad, adaptándolas para la evaluación de la accesibilidad, aporta la capacidad de realizar un análisis más complejo que la evaluación de la accesibilidad en entornos urbanos necesita.

Para la presente tesis se han tenido que hacer algunas simplificaciones, tanto en la metodología de evaluación como en el número de aspectos considerados, pero se ha desarrollado una metodología extensible que permitirá incorporarlos en el futuro.

Por otra parte, se han buscado herramientas de análisis y visualización de los resultados que permitan ver más allá de la complejidad inherente a todo análisis urbano, para permitir la toma de decisiones correctoras adecuadas. Un ejemplo de ello es la detección discontinuidades en las redes de movilidad, que pueden solventarse con una única intervención.

También se ha hecho especial hincapié en la máxima difusión de los resultados obtenidos, que permite por una parte facilitar los recorridos más accesibles a las personas que lo necesitan y por otra la toma de consciencia de los problemas de accesibilidad.

La obtención de datos topográficos y la identificación de ciertos tipos de obstáculos como las escaleras es un aspecto esencial en la evaluación de la accesibilidad.

La utilización de los datos obtenidos mediante la tecnología de escáner láser para la generación de la topografía y la caracterización de los obstáculos era el objetivo secundario de la presente tesis. Este es un ámbito en el que se están desarrollando grandes avances y la generalización del uso de la tecnología LIDAR²⁸ permitiría aplicar la metodología grandes extensiones de territorio. También se ha comprobado que los

²⁸ La nueva versión de *AutoCAD 2011* permite trabajar con nubes de puntos

datos de la nube de puntos permiten obtener los límites de las edificaciones y la identificación de las escaleras.

Por otra parte, se han desarrollado técnicas para visualizar en plano estas nubes de puntos, empleando técnicas de representación arquitectónicas. Filtrando los puntos más altos y elaborando un mapa de pendientes conseguimos un plano equivalente a una planta arquitectónica donde aparecen representados por sus límites los muros y otros elementos en proyección horizontal. Estas representaciones permiten generar un mapa detallado de accesibilidad para su difusión.

Finalmente, como propuestas de futuro, algunos aspectos de esta investigación pueden aplicarse a distintos ámbitos:

- Incorporación la información 3D a un GPS para su uso en bicicletas y así poder evitar pendientes excesivas.
- Utilización de la caracterización de la topografía para el análisis de cubiertas complejas o en paisajismo para una mejor gestión de las escorrentías.
- Herramientas de soporte para la elaboración de planes de accesibilidad municipales y posterior gestión de la accesibilidad.
- Obtención de las rutas del ámbito en 3D ya sea mediante vuelos virtuales generados por la propia aplicación, via web con X3D²⁹, incrustados en archivos PDF o mediante *Google Earth*.

²⁹ Sucesor de VRML (*Virtual Reality Modelling Language*)

11 Bibliografía

- AENOR. (2007). *UNE 170001-1:2007, Accesibilidad universal Parte 1: Criterios DALCO para facilitar la accesibilidad al entorno*. Madrid: AENOR.
- AENOR. (2007). *UNE 170001-2:2007, Accesibilidad universal Parte 2: Sistema de gestión de la accesibilidad*. Madrid: AENOR.
- Ajuntament de Tossa de Mar. (2010). Recuperado el 5 de Julio de 2010, de Web de l'Ajuntament de Tossa de Mar: <http://www.tossademar.net/>
- Axelsson, P. (2000). DEM Generation from Laser Scanner Data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* (33), 110-117.
- Barrio, J. (2010). Recuperado el 5 de Julio de 2010, de Goolzoom: <http://www.goolzoom.com/>
- Bartels, M., & Wei, H. (2006). Towards DTM Generation from LIDAR Data in Hilly Terrain using Wavelets., (pp. 33-36). Hong Kong.
- Bartels, M., Wei, H., & Mason, D. C. (2006). DTM Generation from LIDAR Data Using Skewness Balancing. *18th International Conference on Pattern Recognition*, (pp. 566-569). Hong Kong.
- Błaszczak-Bąk, W., Janowski, A., Kamiński, W., & Rapiński, J. (2010). Modification of Lidar Point Cloud Processing Methodology. *FIG Congress*. Sydney.
- de Smith, M. J., Longley, P. A., & Goodchild, M. (2007). *Geospatial Analysis: A Comprehensive Guide to Principles, Techniques and Software Tools* (2nd ed.). Leicester: Troubador Publishing Ltd.
- del Moral, C. (2006). *Modelo de verificación de la accesibilidad en los edificios*. Granada: Universidad de Granada.
- del Moral, C., & Delgado, L. (2010). Evaluación de los niveles de accesibilidad en los entornos patrimoniales. *ACE: Arquitectura, Ciudad y Entorno* (13), 41-60.
- Departament de Benestar Social. (1995). *Decret 135/1995, de 24 de març, de desplegament de la Llei 20/1991, de 25 de novembre, de promoció de l'accessibilitat i*

de supressió de barreres arquitectòniques, i d'aprovació del Codi d'accessibilitat.

Barcelona: Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya.

Departament de Benestar Social. (2009). *Decret 55/2009, de 7 d'abril, sobre les condicions d'habitabilitat dels habitatges i la cèdula d'habitabilitat.* Barcelona: Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya.

Departament de Benestar Social. (2002). *Guia bàsica per a la redacció d'un Pla d'Accessibilitat Municipal (via pública i edificació).* Barcelona: Departament de Benestar Social.

Dirección General del Catastro. (2010). *Servicio de publicación de mapas catastrales en INTERNET.* Recuperado el 5 de Julio de 2010, de Dirección General del Catastro: <http://www.catastro.meh.es/servicios/wms/wms.htm>

Duckham, M., & Worboys, M. (2004). *GIS: A Computing Perspective.* Boca Raton, FL: CRC Press.

Fisher, P. W. (2004). Where is Helvellyn? Fuzziness of Multiscale Landscape Morphometry. *Transactions of the Institute of British Geographers* , 29 (1), 106-128.

Franke, R. (1982). Smooth Interpolation of Scattered Data by Local Thin Plate Splines. *Comp. & Maths. with Appls.* , 8 (4), 237–281.

Generalitat de Catalunya. (1991). *Llei 20/1991, de 25 de novembre, de promoció de l'accessibilitat i de supressió de barreres arquitectòniques.* Barcelona: Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya.

Hutchinson, M. (1989). A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology* (106), 211-232.

ICC. (Marzo de 2009). *Especificacions.* Recuperado el 5 de Julio de 2010, de Web del Institut Cartogràfic de Catalunya: <http://www.icc.cat/content/download/9697/30637/file/ct1m2mv22sh0.pdf>

Jefatura del Estado. (1982). *Ley 13/1982, de 7 de abril, de Integración Social de los Minusválidos.* Madrid: Boletín Oficial del Estado.

- Jefatura del Estado. (2003). *Ley 51/2003, de 2 de diciembre, de igualdad de oportunidades, no discriminación y accesibilidad universal de las personas con discapacidad*. Madrid: Boletín Oficial del Estado.
- Kersting, J., & Kersting, A. P. (2005). Lidar data points filtering using ArcGIS 3D and Spatial Analyst. *25th ESRI User Conference Proceedings*. San Diego, CA.
- Longley, P. A., Goodchild, M., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2010). *Geographic Information Systems and Science* (3rd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Mark, D. M., & Aronson, P. (1984). Scale-Dependent fractal dimensions of topographic surfaces: An empirical investigation with applications in geomorphology and computer mapping. *Mathematical Geology*, 7 (16), 671-683.
- Ministerio de la Presidencia. (2007). *Real Decreto 505/2007, de 20 de abril, por el que se aprueban las condiciones básicas de accesibilidad y no discriminación de las personas con discapacidad para el acceso y utilización de los espacios públicos urbanizados y edificaciones*. Madrid: Boletín Oficial del Estado.
- Ministerio de Vivienda. (2010). *Orden VIV/561/2010, de 1 de febrero, por la que se desarrolla el documento técnico de condiciones básicas de accesibilidad y no discriminación para el acceso y utilización de los espacios públicos urbanizados*. Madrid: Boletín Oficial del Estado.
- Ministerio de Vivienda. (2010). *Real Decreto 173/2010, de 19 de febrero, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, en materia de accesibilidad y no discriminación de las personas con discapacidad*. Madrid: Boletín Oficial del Estado.
- Oliver, M. (1990). Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems. *International Journal of Geographic Information Systems* (4), 313-332.
- Pfaltz, J. L. (1976). Surface networks. *Geographical Analysis*, 8 (1), 77-93.
- POLIS. (2008). *Building and Urban Space Accessibility: POLIS - Decision support tools and policy initiatives in support of universal design of buildings*. Watford: BRE Press.
- Price, M. (2009, Winter). Calculating transportation network slope and travel parameters. *ArcUser*, 50-52.

Price, M. (2008, Spring). Slopes, Sharp Turns, and Speed: Refining Emergency Response Networks to Accommodate Steep Slopes and Turn Rules. *ArcUser* , 50-57.

Priestnall, G., Jaafar, J., & Duncan, A. (2000). Extracting urban features from LiDAR digital surface models. *Computers, Environment and Urban Systems* , 24 (2), 65-78.

Schneider, B. (2005). Surface Networks: Extension of the Topology and Extraction from Bilinear Surface Patches. *Geographical Analysis* , 37 (2), 244-263.

Sibson, R. (1981). *A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation*. New York, NY: John Wiley & Sons.

Sithole, G. (2001). Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* (34), 203-210.

Vosselman, G. (2000). Slope based filtering of laser altimetry data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* (33), 935-942.

Watson, D., & Philip, G. (1985). A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation. *Geoprocessing* (2), 315-327.

Weishampel, J., Patrick, R., Hightower, J., Chase, A., & Chase, D. (2010). LiDAR Detection of Below-Canopy Cave Openings in the Ancient Maya Karstic Landscape around Caracol, Belize. *IGARSS (IEEE Geoscience and Remote Sensing Society)*. Honolulu, HI.

Wood, J. (2000). Constructing Weighted Surface Networks for the Representation and Analysis of Surface Topology. *Proceedings 5th International Conference on GeoComputation*. Chatham.

Wood, J. (1996). *The geomorphological characterisation of digital elevation models PhD Thesis*. University of Leicester.

Yuan, F., Zhang, J. X., Zhang, L., & Gao, J. X. (2009). DEM generation from airborne LIDAR data. *International Conference on Geo-spatial Solutions for Emergency Management and the 50th Anniversary of the Chinese Academy of Surveying and Mapping*, (págs. 308-312). Beijing.

Zeiler, M. (1999). *Modelling Our World*. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, Inc.

12 Anexos

12.1 Código VisualBasic del módulo de identificación de candidatos

```
' -----  
-----  
' Reclass.vbs  
' Created on: Sun Jun 27 2010 06:32:51 PM  
' (generated by ArcGIS/ModelBuilder)  
' -----  
-----  
  
' Create the Geoprocessor object  
set gp = WScript.CreateObject("esriGeoprocessing.GPDispatch.1")  
  
' Check out any necessary licenses  
gp.CheckOutExtension "spatial"  
gp.CheckOutExtension "3D"  
  
' Load required toolboxes...  
gp.AddToolbox "C:/Program  
Files/ArcGIS/ArcToolbox/Toolboxes/Spatial Analyst Tools.tbx"  
gp.AddToolbox "C:/Program Files/ArcGIS/ArcToolbox/Toolboxes/3D  
Analyst Tools.tbx"  
  
' Set the Geoprocessing environment...  
gp.scratchWorkspace = "C:\PATRAC\Scratch.gdb"  
gp.extent = "494458.017499131 4618416.86241715 494666.470908555  
4618625.45455789"  
  
' Local variables...  
Slope_Result = "C:\PATRAC\Scratch.gdb\Slope Result"  
Points_Interpolated__Natural_Neighbor_ =  
"C:\PATRAC\PATRAC.gdb\Points_Natural"  
Slope_Reclass = "C:\PATRAC\Scratch.gdb\Slope_Reclass"  
Range_Result = "C:\PATRAC\Scratch.gdb\Range_Result"  
Range_Reclass = "C:\PATRAC\Scratch.gdb\Range_Reclass"  
Desv_Result = "C:\PATRAC\Scratch.gdb\Desv_Result"  
Desv_Reclass = "C:\PATRAC\Scratch.gdb\Desv_Reclass"  
Curvature_Result = "C:\PATRAC\Scratch.gdb\Curvature"  
Curvature_Result__Profile_ =  
"C:\PATRAC\Scratch.gdb\Curvature_Profile"  
Curvature_Result__Plan_ = "C:\PATRAC\Scratch.gdb\Curvature_Plan"  
Curvature__Profile__Reclass =  
"C:\PATRAC\Scratch.gdb\Curvature_Profile_Reclass"  
  
' Process: Slope...  
gp.Slope_sa Points_Interpolated__Natural_Neighbor_,  
Slope_Result, "PERCENT_RISE", "1"
```

```
' Process: Reclassify Slope...
gp.Reclassify_sa Slope_Result, "Value", "0 50 1;50 99999 2",
Slope_Reclass, "DATA"

' Process: Range...
gp.FocalStatistics_sa Points_Interpolated__Natural_Neighbor_,
Range_Result, "Rectangle 3 3 CELL", "RANGE", "DATA"

' Process: Reclassify Range...
gp.Reclassify_sa Range_Result, "VALUE", "0 0.200000000000000001
1;0.200000000000000001 99999 2", Range_Reclass, "DATA"

' Process: Desv...
gp.FocalStatistics_sa Points_Interpolated__Natural_Neighbor_,
Desv_Result, "Rectangle 3 3 CELL", "STD", "DATA"

' Process: Reclassify Desv...
gp.Reclassify_sa Desv_Result, "VALUE", "0 0.100000000000000001
1;0.100000000000000001 99999 2", Desv_Reclass, "DATA"

' Process: Curvature...
gp.Curvature_sa Points_Interpolated__Natural_Neighbor_,
Curvature_Result, "1", Curvature_Result__Profile_,
Curvature_Result__Plan_

' Process: Reclassify Curvature (Profile)...
gp.Reclassify_3d Curvature_Result__Profile_, "Value", "-
999999999999 -200 1;-200 200 2;200 99999999999 1",
Curvature__Profile__Reclass, "DATA"
```

12.2 Código VisualBasic del módulo de cálculo de pendientes

```
' -----  
-----  
' Pendiente.vbs  
' Created on: Mon Jun 28 2010 07:35:36 PM  
' (generated by ArcGIS/ModelBuilder)  
' Usage: a <Rutas__1m_>  
' -----  
-----  
  
' Create the Geoprocessor object  
set gp = WScript.CreateObject("esriGeoprocessing.GPDispatch.1")  
  
' Load required toolboxes...  
gp.AddToolbox "C:/Program Files/ArcGIS/ArcToolbox/Toolboxes/Data  
Management Tools.tbx"  
  
' Set the Geoprocessing environment...  
gp.scratchWorkspace = "C:\PATRAC\Scratch.gdb"  
gp.workspace = "C:\PATRAC\PATRAC.gdb"  
  
' Script arguments...  
Rutas__1m_ = wscript.arguments.item(0)  
if Rutas__1m_ = "#" then  
    Rutas__1m_ = "C:\PATRAC\Tossa.gdb\Rutas_Simple_3D" ' provide a  
default value if unspecified  
end if  
  
' Local variables...  
Campo_X_Inicio_creado = "C:\PATRAC\Tossa.gdb\Rutas_Simple_3D"  
Campo_X_Inicio = "C:\PATRAC\Tossa.gdb\Rutas_Simple_3D"  
Campo_X_Final_creado = "C:\PATRAC\Tossa.gdb\Rutas_Simple_3D"  
Campo_X_Final = "C:\PATRAC\Tossa.gdb\Rutas_Simple_3D"  
Campo_Y_Inicio_creado = "C:\PATRAC\Tossa.gdb\Rutas_Simple_3D"  
Campo_Y_Inicio = "C:\PATRAC\Tossa.gdb\Rutas_Simple_3D"  
Campo_Y_Final_creado = "C:\PATRAC\Tossa.gdb\Rutas_Simple_3D"  
Campo_Y_Final = "C:\PATRAC\Tossa.gdb\Rutas_Simple_3D"  
Campo_Z_Inicio_creado = "C:\PATRAC\Tossa.gdb\Rutas_Simple_3D"  
Campo_Z_Inicio = "C:\PATRAC\Tossa.gdb\Rutas_Simple_3D"  
Campo_Z_Final_creado = "C:\PATRAC\Tossa.gdb\Rutas_Simple_3D"  
Campo_Z_Final = "C:\PATRAC\Tossa.gdb\Rutas_Simple_3D"  
Pendiente_calculada = "C:\PATRAC\Tossa.gdb\Rutas_Simple_3D"  
Campo_Pendiente_creado = "C:\PATRAC\Tossa.gdb\Rutas_Simple_3D"  
Campos_limpios = "C:\PATRAC\Tossa.gdb\Rutas_Simple_3D"  
  
' Process: Crear campo X Final...  
gp.AddField_management Rutas__1m_, "Fin_X", "DOUBLE", "", "",  
"", "", "NULLABLE", "NON_REQUIRED", ""  
  
' Process: Calcular Campo X Final...  
gp.CalculateField_management Campo_X_Final_creado, "Fin_X",  
"Fin_X", "VB", "dim pcurve as ipolycurve\nset pcurve =
```

```
[shape]\ndim ppt as ipoint\nset ppt = pcurve.toppoint\nndim Fin_X  
as double\nFin_X = ppt.x"  
  
' Process: Crear campo X Inicio...  
gp.AddField_management Rutas__1m_, "Inicio_X", "DOUBLE", "", "",  
"", "", "NULLABLE", "NON_REQUIRED", ""  
  
' Process: Calcular Campo X Inicio...  
gp.CalculateField_management Campo_X_Inicio_creado, "Inicio_X",  
"Inicio_X", "VB", "dim pcurve as ipolycurve\nset pcurve =  
[shape]\ndim ppt as ipoint\nset ppt = pcurve.frompoint\nndim  
Inicio_X as double\nInicio_X = ppt.x"  
  
' Process: Crear campo Y Final...  
gp.AddField_management Rutas__1m_, "Fin_Y", "DOUBLE", "", "",  
"", "", "NULLABLE", "NON_REQUIRED", ""  
  
' Process: Calcular Campo Y Final...  
gp.CalculateField_management Campo_Y_Final_creado, "Fin_Y",  
"Fin_Y", "VB", "dim pcurve as ipolycurve\nset pcurve =  
[shape]\ndim ppt as ipoint\nset ppt = pcurve.toppoint\nndim Fin_Y  
as double\nFin_Y = ppt.y"  
  
' Process: Crear campo Y Inicio...  
gp.AddField_management Rutas__1m_, "Inicio_Y", "DOUBLE", "", "",  
"", "", "NULLABLE", "NON_REQUIRED", ""  
  
' Process: Calcular Campo Y Inicio...  
gp.CalculateField_management Campo_Y_Inicio_creado, "Inicio_Y",  
"Inicio_Y", "VB", "dim pcurve as ipolycurve\nset pcurve =  
[shape]\ndim ppt as ipoint\nset ppt = pcurve.frompoint\nndim  
Inicio_Y as double\nInicio_Y = ppt.y"  
  
' Process: Crear campo Z Final...  
gp.AddField_management Rutas__1m_, "Fin_Z", "DOUBLE", "", "",  
"", "", "NULLABLE", "NON_REQUIRED", ""  
  
' Process: Calcular Campo Z Final...  
gp.CalculateField_management Campo_Z_Final_creado, "Fin_Z",  
"Fin_Z", "VB", "dim pcurve as ipolycurve\nset pcurve =  
[shape]\ndim ppt as ipoint\nset ppt = pcurve.toppoint\nndim Fin_Z  
as double\nFin_Z = ppt.z"  
  
' Process: Crear campo Z Inicio...  
gp.AddField_management Rutas__1m_, "Inicio_Z", "DOUBLE", "", "",  
"", "", "NULLABLE", "NON_REQUIRED", ""  
  
' Process: Calcular Campo Z Inicio...  
gp.CalculateField_management Campo_Z_Inicio_creado, "Inicio_Z",  
"Inicio_Z", "VB", "dim pcurve as ipolycurve\nset pcurve =  
[shape]\ndim ppt as ipoint\nset ppt = pcurve.frompoint\nndim  
Inicio_Z as double\nInicio_Z = ppt.z"
```

```
' Process: Crear campo Pendiente...
gp.AddField_management Rutas_lm_, "Pendiente", "FLOAT", "", "",
"", "", "NULLABLE", "NON_REQUIRED", ""

' Process: Calcular pendiente...
gp.CalculateField_management Campo_Pendiente_creado,
"Pendiente", "Abs((((Fin_Z] - [Inicio_Z]) / (([Fin_X]-
[Inicio_X])^2 + ([Fin_Y]-[Inicio_Y])^2)^0.5)*100)", "VB", ""

' Process: Borrar campos intermedios...
gp.DeleteField_management Pendiente_calculada,
"Fin_X;Inicio_X;Fin_Y;Inicio_Y;Fin_Z;Inicio_Z"
```

12.3 Código VisualBasic del módulo de cálculo de obstáculos

```
' -----  
-----  
' Obstaculos.vbs  
' Created on: Mon Jun 28 2010 08:05:44 PM  
' (generated by ArcGIS/ModelBuilder)  
' Usage: Obstaculos <Rutas> <Rutas_con_obstaculos>  
' -----  
-----  
  
' Create the Geoprocessor object  
set gp = WScript.CreateObject("esriGeoprocessing.GPDispatch.1")  
  
' Set the necessary product code  
gp.SetProduct "ArcInfo"  
  
' Load required toolboxes...  
gp.AddToolbox "C:/Program  
Files/ArcGIS/ArcToolbox/Toolboxes/Analysis Tools.tbx"  
  
' Set the Geoprocessing environment...  
gp.scratchWorkspace = "C:\PATRAC\Scratch.gdb"  
  
' Script arguments...  
Rutas = wscript.arguments.item(0)  
if Rutas = "#" then  
    Rutas = "C:\PATRAC\PATRAC.gdb\Rutas_Simple_3D_1m" ' provide a  
default value if unspecified  
end if  
  
Rutas_con_obstaculos = wscript.arguments.item(1)  
if Rutas_con_obstaculos = "#" then  
    Rutas_con_obstaculos =  
"C:\PATRAC\Scratch.gdb\Rutas_Simple_3D_1m_4_Illuminación" '  
provide a default value if unspecified  
end if  
  
' Local variables...  
Altura_Incorporada =  
"C:\PATRAC\Scratch.gdb\Rutas_Simple_3D_1m_1_Altura"  
Altura__ICC_ = "C:\PATRAC\Tossa.gdb\Obstaculo_Altura_ICC"  
Anchura_Incorporada =  
"C:\PATRAC\Scratch.gdb\Rutas_Simple_3D_1m_2_Anchura"  
Anchura = "C:\PATRAC\Tossa.gdb\Obstaculo_Anchura"  
Escalera_Incorporada =  
"C:\PATRAC\Scratch.gdb\Rutas_Simple_3D_1m_3_Escaleras"  
Escaleras = "C:\PATRAC\Tossa.gdb\Obstaculo_Escaleras_ICC"  
Illuminación = "C:\PATRAC\Tossa.gdb\Obstaculo_Farolas"  
  
' Process: Calculo Altura...  
gp.Identity_analysis Rutas, Altura__ICC_, Altura_Incorporada,  
"NO_FID", "", "NO_RELATIONSHIPS"
```

```
' Process: Calculo Anchura...  
gp.Identity_analysis Altura_Incorporada, Anchura,  
Anchura_Incorporada, "NO_FID", "", "NO_RELATIONSHIPS"  
  
' Process: Calculo Escalera...  
gp.Identity_analysis Anchura_Incorporada, Escaleras,  
Escalera_Incorporada, "NO_FID", "", "NO_RELATIONSHIPS"  
  
' Process: Calculo Iluminación...  
gp.Identity_analysis Escalera_Incorporada, Iluminación,  
Rutas_con_obstaculos, "NO_FID", "", "NO_RELATIONSHIPS"
```