

**HERRAMIENTA PARA AUTOMATIZAR LA GENERACIÓN DE UN MODELO
TRIDIMENSIONAL DE ELEMENTOS URBANOS**

ELVER OMAR GALLO LANCHEROS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA**

2013

**HERRAMIENTA PARA AUTOMATIZAR LA GENERACIÓN DE UN MODELO
TRIDIMENSIONAL DE ELEMENTOS URBANOS**

ELVER OMAR GALLO LANCHEROS

**Trabajo de Investigación para optar al Título de Magíster en Ingeniería de
Sistemas e Informática**

Director:

JHON JAIRO CÁCERES JIMÉNEZ

PhD Ingeniería Civil

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA**

2013

DEDICATORIA

Te dedico este gran esfuerzo a ti mamita querida...gracias por todas tus enseñanzas y por ese amor tan grande que tuviste conmigo...con tu partida se fue la mitad de mi corazón...me quedo con la esperanza de que algún día nos volvamos a encontrar...

A ti esposa mía te dedico este logro, por su apoyo incondicional, por ser mi compañera de luchas en todo este tiempo desde que decidimos estar juntos. Gracias por entenderme y por ser ese refugio donde se calman las aguas de mi turbulencia vida.

Te amo con todo mi corazón.

A mi hermosísima Salomé, por ser la musa de mi inspiración en esas noches largas que pasaba frente al computador, pensar en ti era la mejor manera de llenarme de fuerzas en aquellos momentos que sentía derrumbarme.

Eres el regalo más grande que me ha dado la vida.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a ti mi Señor por darme la sabiduría necesaria para entender aquellas cosas que parecían indescifrables y por el milagro que diariamente hace en mí.

Un agradecimiento especial al profesor Hernán Porras, por su apoyo y colaboración para poder alcanzar esta meta tan anhelada, su ejemplo de trabajo y perseverancia es la inspiración de cualquier persona que desee ser exitosa en su profesión.

También doy gracias de manera especial mi director de proyecto el profesor Jhon Cáceres, por siempre estar dispuesto a orientarme y a proporcionarme los medios necesarios para encontrar las mejores soluciones.

A mi compañero Nelson Díaz, por sus valiosos aportes para lograr sacar adelante de este trabajo de investigación.

Al grupo de investigación GEOMÁTICA, por brindarme las herramientas necesarias para lograr culminar con éxito este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	23
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	25
2. PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN	27
2.1 OBJETIVO PRINCIPAL	27
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	29
4. ESTADO DEL ARTE	30
4.1 ADQUISICIÓN DE DATOS	30
4.1.1 Escáner Láser Terrestre (TLS).	30
4.1.1.1 Principios de operación.	31
4.1.1.2 Características técnicas.	34
4.1.1.3 Modo de operación.	36
4.2 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS	37
4.2.1 Registro de las nubes de puntos.	39
4.2.2 Georreferenciación de la nube de puntos.	41
4.2.3 Selección y Extracción de Características.	43
4.2.4 Segmentación de la nube de puntos.	45
4.2.4.1 Segmentación basada en la detección de bordes.	45
4.2.4.2 Segmentación basada en el crecimiento de regiones.	46
4.2.4.3 Segmentación basada en la agrupación de características (<i>Clustering</i>).	46
4.2.4.4 Segmentación basada en la línea de escaneo.	47

4.2.4.5 Segmentación mediante el ajuste a un modelo.	48
4.2.4.6 Otros métodos de segmentación.	48
4.2.5 Clasificación de objetos en nube de puntos.	49
4.2.5.1 Clasificación basada en las características radiométricas.	50
4.2.5.2 Clasificación basada en las características geométricas.	50
4.2.6 Generación de modelos tridimensionales.	52
4.2.6.1 Geometría sólida constructiva – CSG (Constructive Solid Geometry).	53
4.2.6.2 Representación de fronteras - B-rep (Boundary Representation).	53
4.3. CITYGML	56
4.3.1 Visión general de CityGML.	58
4.3.2 Notación UML.	59
4.3.3 Espacios de nombres y Módulos de CityGML	60
4.3.4 Características generales	61
4.3.4.1 Modularidad.	61
4.3.4.2 Modelado multiescala (cinco niveles de detalle - LOD).	62
4.3.4.3 Modelado semántico-geométrico coherente.	62
4.3.4.4 Superficies de cierre.	63
4.3.4.5 Curvas de intersección del terreno.	63
4.3.4.6 Diccionarios y lista de códigos externa.	63
4.3.4.7 Referencias externas.	63
4.3.4.8 Grupos de objetos de ciudad.	64
4.3.4.9 Apariencias.	64
4.3.4.10 Concepto de prototipos de objetos.	64
4.3.4.11 Objetos de ciudad y atributos genéricos.	65
4.3.5. Módulos de CityGML.	65
4.3.5.1 Módulo CityFurniture.	65
4.3.5.2 Lista externa de códigos del módulo CityFurniture.	67
4.4. SEÑALES DE TRÁNSITO	68
4.4.1 Conceptos básicos sobre las señales de tránsito	69
4.4.1.1 Función.	69

4.4.1.2	Visibilidad.	69
4.4.1.3	Uso.	69
4.4.2	Clasificación de las Señales de tránsito.	69
4.4.2.1	Señales Verticales.	70
4.4.2.1.1	Ubicación.	70
4.4.2.1.2	Dimensiones.	71
4.4.3	Señales Preventivas.	73
4.4.4	Señales Reglamentarias.	75
4.4.5	Señales Informativas.	78
5.	DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN	81
5.1.	METODOLOGÍA DE DESARROLLO	81
5.2.	ADQUISICIÓN DE LOS DATOS	86
5.2.1	Características técnicas del escáner RIEGL VZ-400.	86
5.2.2	Planificación del levantamiento de la información.	90
5.2.3	Levantamiento de la información.	93
5.3.	REGISTRO DE LAS NUBES DE PUNTOS	98
5.4.	GEOREFERENCIACIÓN DE LA NUBE DE PUNTOS	105
5.4.1	Configuración y establecimiento del receptor Base:	108
5.4.2	Levantamiento de puntos con el receptor Móvil.	110
5.4.3	Creación de los Puntos de Control en la Nube de Puntos.	112
5.5.	PRE-PROCESAMIENTO DE LA NUBE DE PUNTOS	119
5.6.	SEGMENTACIÓN DE LA NUBE DE PUNTOS	123
5.6.1	Filtrado del terreno – método de OTSU.	123
5.6.1.1	Fundamentos.	123
5.6.1.2	Implementación.	125
5.6.2	Segmentación basada en la teoría de grafos mediante el método RBNN.	130
5.6.2.1	Fundamentos.	131
5.6.2.2	Implementación.	132
5.6.3	Segmentación basada en el análisis de componentes principales – PCA.	134

5.6.3.1 Fundamentos.	135
5.6.3.2 Implementación.	136
5.6.4 Filtrado del ruido.	138
5.6.4.1 Fundamentos.	139
5.6.4.2 Implementación.	139
5.6.5 Segmentación basada en la identificación de postes.	141
5.6.5.1 Fundamentos.	141
5.6.5.2 Implementación.	143
5.6.6 Segmentación basada en la detección de superficies planas mediante el método de RANSAC.	148
5.6.6.1 Fundamentos.	149
5.6.6.2 Implementación.	149
5.7. DESCRIPCIÓN	152
5.7.1 Área.	153
5.7.2 Lados.	154
5.7.3 Ángulos.	154
5.8. INTERPRETACIÓN Y CLASIFICACIÓN	154
5.8.1 Fundamentos.	154
5.8.2 Implementación.	157
5.8.2.1 Transformación geométrica	157
5.8.2.2 Envolverte Convexa.	161
5.8.2.3 MBR, MBC, MBO y MBT.	163
5.8.2.4 Clasificación.	166
5.9. MODELO TRIDIMENSIONAL	170
5.10 HERRAMIENTA COMPUTACIONAL	176
6. RESULTADOS	185
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	188

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	190
BIBLIOGRAFÍA	200
ANEXOS	213

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación del láser según UNE EN 60825-1/A2-2002	34
Tabla 2. Características técnicas de los escáneres láser terrestre más comerciales en la actualidad	35
Tabla 3. Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de georreferenciación	42
Tabla 4. Lista de módulos con su identificadores de espacios de nombres y ejemplos de los prefijos	60
Tabla 5. Dimensiones de los tableros de las señales verticales en vías urbanas	71
Tabla 6. Ficha técnica del Escáner RIEGL VZ-400	87
Tabla 7. Características del patrón de escaneo Panorama 60	93
Tabla 8. Características de las nubes de puntos de cada posición de escaneo de la carrera 27 entre calles 14 y 18	97
Tabla 9. Coordenadas GPS-ST-UIS-1	109
Tabla 10. Coordenadas de la Base y de los Puntos de Control levantados en la Cra. 27 entre calles 14 y 18	111
Tabla 11. Tamaño de las secciones de la nube de puntos de la carrera 27 entre calles 14 y 18	122
Tabla 12. Resultado de la segmentación basada en Otsu de los puntos del suelo	130
Tabla 13. Resultados de la segmentación basada en el algoritmo RBNN de las secciones de la nube de puntos	133
Tabla 14. Resultados de la Segmentación basada en PCA de las secciones de la nube de puntos	138
Tabla 15. Resultados de la Segmentación basada en la identificación de postes de las secciones de la nube de puntos	147

Tabla 16. Resultados de la Segmentación basada en la detección de Superficies Planas de las secciones de la nube de puntos	151
Tabla 17. Dimensiones de las características geométricas de las señales de tránsito	154
Tabla 18. Matriz de votación para la clasificación de señales de tránsito	167
Tabla 19. Descripción de los Casos de Uso	178
Tabla 20. Clasificación de Señales de Tránsito por la Herramienta	186

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Escáner láser terrestre y nube de puntos	30
Figura 2. Subsistemas del escáner láser terrestre y modo de operación	31
Figura 3. Principio de medición por tiempo de vuelo - TOF	32
Figura 4. Principio de medición por diferencia de fase - PD	33
Figura 5. Principio de medición por triangulación	33
Figura 6. Esquema de escaneo de un objeto desde dos posiciones diferentes con cierto grado de traslapo	37
Figura 7. a) Nube de puntos cruda. b) Nube de puntos con textura	38
Figura 8. Tipos de dianas artificiales	40
Figura 9. a) Selección de Características. b) Extracción de Características	43
Figura 10. Categoría genérica de objetos en un escenario urbano escaneado	50
Figura 11. Primitivas para sistemas de modelado de sólidos	53
Figura 12. Etiquetado y organización de vértices, aristas y caras d B-rep cúbica	54
Figura 13. Generación de modelos tridimensionales con textura	55
Figura 14. Diagrama UML de Paquetes de los módulos de CityGML y sus esquemas independientes	61
Figura 15. Niveles de detalle - LOD definidos por CityGML	62
Figura 16. Referencias externas de CityGML	64
Figura 17. Ejemplos de prototipos de formas en CityGML	65
Figura 18. Imagen digital de un paradero de bus (izquierda) y modelo tridimensional del mismo paradero de bus (derecha)	66
Figura 19. Diagrama UML de los objetos del módulo CityFurniture	67
Figura 20. Lista de códigos externos del módulo CityFurniture	68
Figura 21. Ubicación de las señales de tránsito verticales en el entorno urbano	71
Figura 22. Dimensiones internas de los postes para señales verticales	72

Figura 23. Dimensión de la Señal Preventiva	73
Figura 24. Señales Preventivas	74
Figura 25. Dimensiones de la Señal Reglamentaria Circular	75
Figura 26. Dimensiones de la Señal Reglamentaria - Pare	76
Figura 27. Dimensiones de la Señal Reglamentaria - Ceda el Paso	77
Figura 28. Señales Reglamentarias	78
Figura 29. Dimensiones de la Señal Informativa	79
Figura 30. Señales Informativas	80
Figura 31. Diagrama de flujo de la Metodología usada en este trabajo de investigación	84
Figura 32. Metodología didáctica usada en este trabajo de investigación	85
Figura 33. Escáner Láser Terrestre RIEGL VZ-400	86
Figura 34. Señales de eco de los diferentes tipos de objetivos	87
Figura 35. Parte trasera del Escáner Láser Terrestre RIEGL VZ-400	89
Figura 36. Parte frontal del Escáner Láser Terrestre RIEGL VZ-400	90
Figura 37. Registro fotográfico de la carrera 27 entre calles 14 y 18	91
Figura 38. Fotografía aérea de la carrera 27 entre calles 14 y 18	92
Figura 39. Levantamiento de la información con el Escáner Láser Terrestre montado sobre una camioneta	94
Figura 40. Imagen panorámica en 2D de la posición de escaneo No.007 visualizada a través de la interfaz gráfica del Escáner Láser Terrestre	95
Figura 41. Visualización de la nube de puntos de la posición de escaneo Scan005	97
Figura 42. Interfaz gráfica del software RiSCAN PRO 1.7	99
Figura 43. Nube de puntos de las posiciones de escaneo Scan009 y Scan010 sin Registrar	100
Figura 44. Registro de nube de puntos mediante la herramienta Multistation Adjustment de RiSCAN PRO	102
Figura 45. Resultado del Registro de las nubes de puntos de las posiciones Scan009 y Scan010	103

Figura 46. Nube de puntos registrada del escaneo de la carrera 27 entre calles 14 y 18 clasificada por rangos de alturas	104
Figura 47. Nube de puntos registrada del escaneo de la carrera 27 entre calles 14 y 18 con el valor RGB asignado a cada punto	104
Figura 48. Equipo GNSS RTK marca TOPCON GR-3	106
Figura 49. Pasos para la transformación del sistema de coordenadas del escáner de un punto P al sistema de coordenadas del proyecto, luego al sistema de coordenadas global y viceversa	108
Figura 50. Ubicación del vértice GPS-ST-UIS-1 en la Universidad Industrial de Santander	109
Figura 51. Configuración del receptor Base sobre el vértice GPS-ST-UIS-1	110
Figura 52. Levantamiento de las coordenadas de los Puntos de Control 13, 18 y 28 en la Cra. 27 entre calles 14-18	111
Figura 53. Punto de Enlace tp013 creado en la posición de escaneo ScanPos008	112
Figura 54. Traslado del Punto de Enlace tp013 del Sistema de Coordenadas de la Posición de Escaneo (SOCS) al Sistema de Coordenadas del Proyecto (PRCS)	113
Figura 55. Listado de los Puntos de Enlace del Proyecto TPL (PRCS) trasladados desde cada una de las posiciones de escaneo	114
Figura 56. Carga de los Puntos de Control levantados con GNSS al listado de Puntos de Enlace del Sistema Global (GLCS)	115
Figura 57. Cálculo de la Matriz de Transformación POP (Project Orientation and Position)	116
Figura 58. Correspondencia entre los Puntos de Control del Proyecto con los Puntos de Enlace de cada posición de escaneo	117
Figura 59. Cantidad de Puntos de Enlace encontrados, Desviación estándar y Cálculo de la Matriz de Transformación	118
Figura 60. Resultado de la Georreferenciación de la posición de escaneo ScanPos010	119

Figura 61. Esquema de la partición de una nube de puntos recolectada a lo largo de una vía	120
Figura 62. Partición de la nube de puntos recolectada de la carrera 27 entre calles 14 y 18	121
Figura 63. Sección 8 de la Nube de Puntos de la carrera 27 entre calles 14 y 18	122
Figura 64. Histograma de los valores de la coordenada Z (altura)	126
Figura 65. Varianza de los puntos de los objetos que se encuentran encima del suelo (B) vs umbral (T)	127
Figura 66. Filtrado de los puntos que pertenecen al Suelo de la Sección 8	129
Figura 67. Comparación del desempeño en la segmentación basada en grafos	132
Figura 68. Resultado de la segmentación basada en el algoritmo RBNN de la Sección 8	133
Figura 69. Transformación del espacio mediante el método PCA.	135
Figura 70. Resultado de la segmentación basada en PCA de la Sección 8	137
Figura 71. Segmentos Lineales con presencia de Ruido	139
Figura 72. Segmentos Lineales con Ruido detectado	141
Figura 73. Principio de percentiles para el reconocimiento de poles	142
Figura 74. División de Segmentos Lineales en Deciles	144
Figura 75. Puntos del tercer decil proyectados sobre los diez planos que lo dividen	145
Figura 76. Envolverte convexa y cálculo de la diagonal de los puntos proyectados sobre los planos	146
Figura 77. . Resultado de la segmentación basada en la identificación de postes de la Sección 8	147
Figura 78. Resultado de la segmentación basada en la detección de superficies planas de la Sección 8	151
Figura 79. Clasificación de los diferentes tipos de señales de tránsito en Europa	156
Figura 80. Resultados de la clasificación de las señales de tránsito en [39]	156

Figura 81. Pasos para la generación del Envolverte Convexa (<i>ConvexHull</i>)	162
Figura 82. Resultado del ajuste de una Envolverte Convexa a los segmentos identificados con superficies planas de la Sección 8	163
Figura 83. Cálculo de los lados del octágono a partir de los lados de un cuadrado.	165
Figura 84. Resultado del ajuste de un MBR, MBC, MBO y MBT a los segmentos identificados con superficies planas de la Sección 8	166
Figura 85. Resultado de la clasificación de las señales de tránsito en la Sección 8	170
Figura 86. Coordenadas de los vértices de la señal preventiva de la Sección 8 incluidas en el archivo CityGML	172
Figura 87. Imágenes de las señales de tránsito usadas para texturizar los modelos tridimensionales	173
Figura 88. Aplicación de la textura a la señal preventiva reconocida en la Sección 8	174
Figura 89. Interfaz del software FZKViewer para reproducir los modelos de CityGML	175
Figura 90. Señal de tránsito Preventiva e Informativa reconocidas dentro de la Sección 8 y reproducidas mediante FZKViewer	176
Figura 91. Diagrama de Casos de Uso	177
Figura 92. Ventana principal de la Herramienta Software	213
Figura 93. Barra de Herramientas	214
Figura 94. Botones para realizar paso a paso la generación del modelo 3D de las señales de tránsito	215
Figura 95. Tabla de Resultados	217
Figura 96. Eje de coordenadas para visualizar la nube de puntos	217
Figura 97. Opción Abrir Nube de Puntos	218
Figura 98. Nube de puntos cargada en la herramienta software	219
Figura 99. Resultado del filtrado de los puntos del Suelo	220
Figura 100. Resultado de la segmentación basada en Clustering	221

Figura 101. Resultado de la segmentación basada en PCA para identificar los segmentos lineales, planos y volumétricos	222
Figura 102. Resultado de la filtrado del Ruido en los segmentos lineales	223
Figura 103. Resultado de la segmentación para identificar segmentos con postes	224
Figura 104. Resultado de la segmentación basada en RANSAC para identificar segmentos con superficies planas	225
Figura 105. Resultado de la Clasificación de las señales de tránsito	226
Figura 106. Selección del directorio para almacenar los modelos 3D de las señales de tránsito	227
Figura 107. Ruta del directorio y cantidad de señales de tránsito almacenadas	227
Figura 108. Selección del archivo .EXE de la aplicación que va a reproducir los modelos 3D CityGML	228
Figura 109. Interfaz gráfica de FZKViewer	229

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL	213
ANEXO B. ESQUEMA DE UN ARCHIVO CITYGML DE UNA SEÑAL PREVENTIVA	230

RESUMEN

TÍTULO: HERRAMIENTA PARA AUTOMATIZAR LA GENERACIÓN DE UN MODELO TRIDIMENSIONAL DE ELEMENTOS URBANOS*

AUTOR: Elver Omar Gallo Lancheros**

Palabras Clave: Escáner láser terrestre, señales de tránsito, filtrado, segmentación, clasificación, modelo tridimensional, CityGML.

El presente trabajo de investigación se deriva de la necesidad de poder generar modelos tridimensionales de elementos urbanos, con el fin de actualizar el banco de datos del mobiliario de un municipio, para que sirva de apoyo a las entidades gubernamentales en sus procesos de planeación urbana, el análisis estructural de las edificaciones, rutas para los organismos de emergencias y el turismo virtual. De igual manera, este trabajo establecerá las bases para el desarrollo de una herramienta que permita la generación automática de modelos de ciudades virtuales en 3D.

Con la adquisición del escáner láser terrestre marca RIEGL VZ-400 por parte del grupo de investigación Geomática de la escuela de Ingeniería Civil, para llevar a cabo los levantamientos topográficos correspondientes a sus proyectos de investigación y extensión, surge el interés de desarrollar herramientas que permitan automatizar los procesos de reconocimiento de objetos dentro de la información recolectada por este dispositivo, de tal manera que se puedan hacer diferentes tipos de análisis sobre los elementos de cualquier mobiliario urbano escaneado.

El desarrollo de esta herramienta de software fue soportado por una conjunción entre la metodología clásica del reconocimiento de patrones y la del desarrollo de software basado en prototipos. El enfoque principal de esta aplicación fue el reconocimiento de las señales de tránsito contenidas dentro de la información recolectada por el escáner láser terrestre, la implementación de un método de georreferenciación sobre toda esta información y la generación de modelos tridimensionales de las señales de tránsito en el estándar internacional de CityGML para el modelado de ciudades virtuales en 3D.

* Trabajo de Investigación

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática. Maestría en Ingeniería de Sistemas e Informática. Director: Jhon Jairo Cáceres Jiménez.

ABSTRACT

TITLE: TOOL FOR AUTOMATE THE GENERATION OF A THREE-DIMENSIONAL MODEL OF URBAN ELEMENTS*

AUTHOR: Elver Omar Gallo Lancheros**

Key words: Terrestrial Laser Scanner, Traffic signal, filtering, segmentation, classification, 3D model, CityGML.

The present research work comes from the need to generate three-dimensional models of urban elements, in order to update the database of the furniture of a municipality, to serve as a support to government entities in urban planning processes, structural analysis of buildings, routes for emergency agencies and virtual tourism. Similarly, this work will lay the groundwork for the development of a tool to automatically generate models of 3D virtual cities.

With purchase of terrestrial laser scanner RIEGL VZ-400 by research group Geomática of the Civil Engineering School, for their research and extension projects, become interested in developing tools to automate the process of recognition of objects inside information collected by this device, so that they can make different types of analysis on urban furniture items scanned.

The development of this software tool was supported by a conjunction between the classical methodology of the pattern recognition and the development of prototype-based software. The principal approach of the this tool was the recognition of the traffic signals contained into information collected by terrestrial laser scanner, implementation of a method of georeferencing over this information and the generation of three dimensional models using the international standard of CityGML to modeled of virtual 3D cities.

* Researching Work

** Physical Mechanics Engineering Faculty. Informatics and Systems Engineering School. Master in Systems Engineering and Informatics. Director: Jhon Jairo Cáceres Jiménez

INTRODUCCIÓN

La tecnología del escáner láser surgió inicialmente como respuesta al problema de cómo hacer mediciones sobre la superficie de la tierra, con el fin de generar la cartografía y los modelos digitales de elevación con alto grado de precisión, ya que los métodos tradicionales no eran muy confiables y su construcción consumía bastante tiempo. Estas mediciones empezaron a ser una realidad con el invento del primer instrumento llamado Medidor Electrónico de Distancia (Electronic Distance Measurement – EDM) [1] y que posteriormente dio paso a la medición basada en la tecnología láser.

Con respecto al principio de operación del láser los escáneres se puede clasificar en los basados en tiempo de vuelo y en diferencia de fase, mientras que, con respecto a la plataforma donde se monta el dispositivo, existe el escáner láser aéreo (*ALS*), el terrestre (*TLS*) y recientemente el móvil (*MLS*). El *ALS* fue introducido comercialmente a comienzos de los años setenta [2], [3], con el fin de generar modelos digitales de elevación y de ciudades a gran escala. Posteriormente, a finales de los años noventa es lanzado comercialmente el *TLS* [3], con el fin de obtener mediciones con alta precisión de los elementos que conforman el mobiliario urbano. El *ALS* genera baja densidad de puntos, por lo tanto, es ideal para capturar información de grandes áreas en corto tiempo y con precisiones del orden de los centímetros, mientras que el *TLS* es usado para capturar información de los objetos a corta distancia, generando una alta cantidad de puntos con precisiones del orden de los milímetros.

La información recolectada por el escáner corresponde a un conjunto de puntos que representan las coordenadas XYZ de la superficie de cualquier objeto con respecto al sistema de referencia del escáner. Adicionalmente, varios de estos

dispositivos también pueden capturar la información espectral del objeto, así como su porcentaje de reflexión que comúnmente se le denomina *valor de intensidad del pulso*.

Una de las aplicaciones más importantes que se le ha dado a la nube de puntos generada por el TLS, es la creación de modelos digitales de ciudades en 3D [4], [5], que son utilizados en la planeación urbana, la navegación virtual de los sitios turísticos, el análisis del estado estructural de los edificios, la detección de posibles zonas de inundación mediante el análisis de la topografía del terreno, la evaluación y análisis de seguridad de vías y puentes, la documentación de áreas de desastre cuando el evento ya ha ocurrido, el registro de la escena del crimen para evitar alteraciones de las evidencias y el suministro de información para los mapas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), entre otros [6].

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

En el año 2009, la Universidad Industrial de Santander a través del grupo de investigación Geomática, llevó a cabo un convenio con la Alcaldía de Bucaramanga para la recolección de la información correspondiente al inventario de los elementos urbanos de la ciudad, esta información sirvió como insumo para el desarrollo del proyecto del Plan de Maestro de Movilidad del municipio, que establece una serie de normas y medidas para la organización del tráfico vehicular como consecuencia de la implementación del sistema integrado de transporte Metrolínea.

Para el levantamiento de esta información se organizaron equipos de trabajo conformados por personal técnico y herramientas especializadas para la captura de datos como, equipos GPS, PDAs, cámaras fotográficas, cintas de medición, estaciones totales de topografía, entre otros. Estos componentes junto con el tiempo que se necesitó para el procesamiento de la información recolectada, influyeron de manera importante en el presupuesto usado para la realización de este proyecto.

Durante el levantamiento de la información de los elementos urbanos que se realiza de forma manual, los equipos de trabajo tuvieron que afrontar varias dificultades, como la dinámica del crecimiento urbano, la complejidad de los escenarios, las condiciones atmosféricas impredecibles, la manipulación de las diferentes herramientas, los cambios continuos en las condiciones de los elementos urbanos y de manera importante, el tiempo en el procesamiento de los datos recolectados. Estos problemas anteriormente mencionados hacen difícil mantener actualizado el banco de datos del mobiliario urbano de cualquier municipio.

Para solucionar el problema del levantamiento de la información topográfica, el grupo de investigación Geomática adscrito a la Escuela de Ingeniería Civil, adquirió un dispositivo llamado el escáner láser terrestre. Este instrumento que se basa en la tecnología de los sensores remotos y recolecta la información topográfica de cualquier entorno en muy corto tiempo y con un alto grado de precisión, independientemente de las condiciones adversas que existan en el área de estudio.

La información recolectada por este dispositivo está compuesta por millones de puntos que contienen las coordenadas XYZ, el valor de intensidad reflejado por el objeto escaneado, la información espectral del objeto en el modelo RGB, la posición del escáner, el sistema de referencia, entre otros. Esta información recolectada se traduce en grandes volúmenes de datos que hacen que el problema se traslade ahora a la etapa de post-procesamiento, debido a que se requiere gran cantidad de tiempo, personal y herramientas computacionales especializadas para la manipulación y el procesamiento de esta información.

Es en esta etapa donde surge la necesidad de contar con una herramienta que permita de alguna manera automatizar varios procesos que se llevan a cabo con la manipulación de esta información, tales como, el filtrado del ruido, la segmentación, la clasificación y el modelado tridimensional de los objetos que se encuentran dentro de esta nube de puntos, con el fin de lograr una disminución de costos en cuanto a tiempo, personal y software especializados, de manera que, permita optimizar los procesos de actualización de la información del mobiliario urbano por parte de las entidades gubernamentales.

2. PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN

Con el fin de facilitar los procesos de planeación urbana mediante la actualización del inventario de los elementos urbanos, se propone la generación de una herramienta que permita llevar a cabo el tratamiento de la información recolectada por el escáner láser terrestre, presentando como un primer paso, esta propuesta de investigación que se concentra en un elemento importante del mobiliario urbano como lo son las señales de tránsito. Por esta razón, se plantea el desarrollo de una herramienta soportada en el uso de las tecnologías de sensores remotos y de la informática, que permita automatizar la generación de modelos tridimensionales de las señales de tránsito que se encuentran dentro de la información recolectada por el escáner láser terrestre.

2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

Desarrollar una herramienta para automatizar la generación de un modelo tridimensional, bajo el estándar CityGML, de las señales de tránsito verticales a partir de la información proveniente de la tecnología de un escáner láser terrestre.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar y desarrollar los algoritmos que permitan segmentar y clasificar los tipos de señales de tránsito verticales, contenidas en una nube de puntos capturada mediante un escáner láser terrestre.

- Implementar un método para la georreferenciación, de las señales de tránsito anteriormente clasificadas, con el fin de que sean ubicadas dentro de un mapa.
- Generar modelos tridimensionales con el estándar CityGML, de los tipos de señales de tránsito anteriormente clasificadas.
- Desarrollar una interfaz de usuario, que permita visualizar la segmentación y clasificación de la nube de puntos y el modelado tridimensional de las señales de tránsito verticales.

3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

A partir de la información proveniente de la tecnología de un escáner láser terrestre, ¿Qué técnicas se deben aplicar, para desarrollar una herramienta, que permita automatizar la generación de un modelo tridimensional, de los elementos urbanos escaneados bajo el estándar de CityGML?

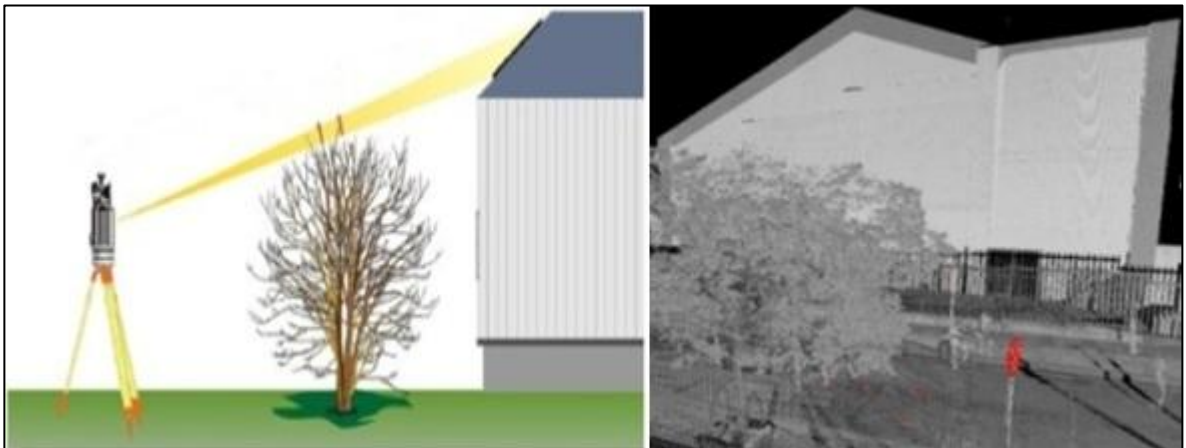
4. ESTADO DEL ARTE

4.1 ADQUISICIÓN DE DATOS

4.1.1 Escáner Láser Terrestre (TLS). Es un sistema basado en la tecnología láser que permite obtener una muestra de la superficie de un objeto de diferente forma y tamaño [6], [7]. El resultado es una nube de puntos con gran detalle en la geometría y con un alto grado de precisión, que se captura de una manera rápida y eficiente [8], ver Figura 1. Estos instrumentos han sido ampliamente usados en la adquisición de información de las áreas urbanas con el fin de generar modelos tridimensionales de las ciudades [4], [5], que son utilizados en áreas como la planeación urbana, los servicios de emergencia, las telecomunicaciones, la arquitectura, el turismo, entre otros.

Geográfica (SIG), entre otros [6].

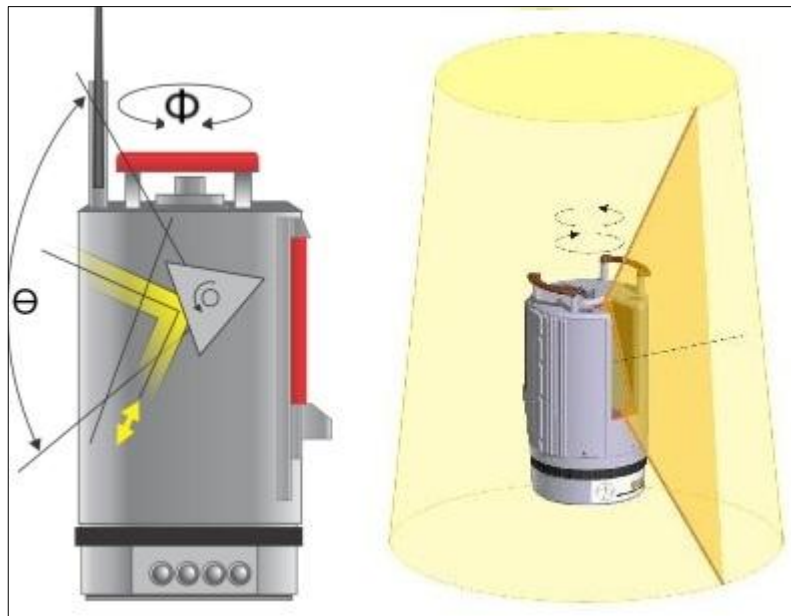
Figura 1. Escáner láser terrestre y nube de puntos



Fuente: 3D Terrestrial Laser Scanner RIEGL VZ-400/1000 General Description and Data Interfaces

4.1.1.1 Principios de operación. El TLS está compuesto por dos subsistemas básicos, el primero es un dispositivo electrónico de emisión de láser comúnmente llamado LIDAR (Light Detection And Ranging), el segundo subsistema es un dispositivo mecánico y óptico capaz de dirigir el haz de láser en forma de escaneo sobre el área de interés [2], como se muestra en la Figura 2. Dependiendo del principio de operación, el rayo láser se utiliza para medir la distancia entre dos puntos de tres formas diferentes: [6], [2], [9] tiempo de vuelo (*TOF del inglés Time Of Flight*), por diferencia de fase (*PD del inglés Phase Difference*) o por triangulación.

Figura 2. Subsistemas del escáner láser terrestre y modo de operación

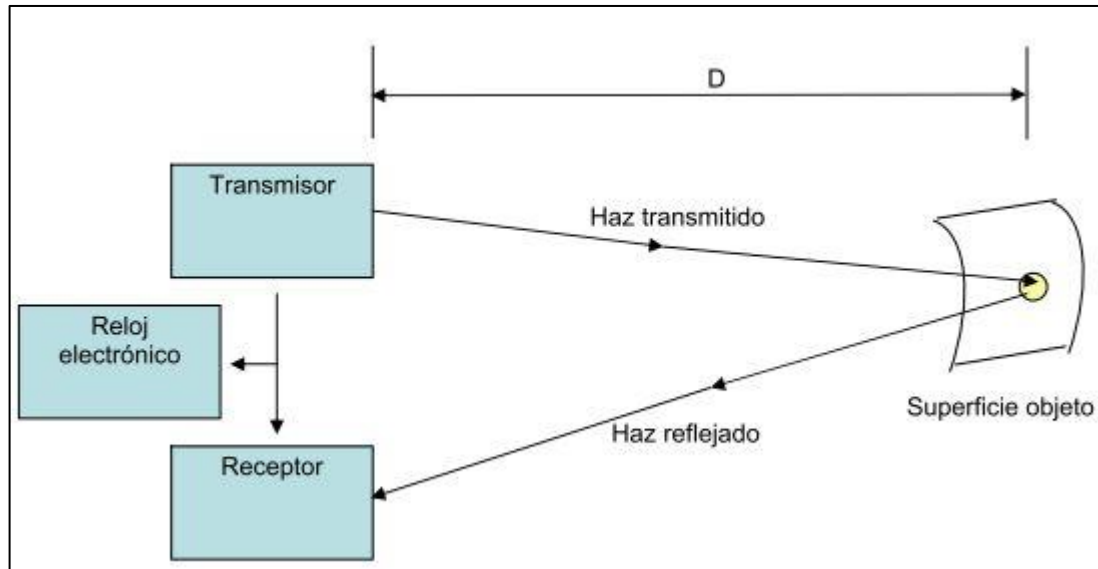


Fuente: Elaboración propia

El escáner TOF tiene la propiedad de que la onda de luz viaja a una velocidad constante en cierto medio, por lo tanto, el tiempo transcurrido desde el momento que sale el pulso láser hasta que retorna puede ser medido y con ese valor calcula la distancia del objetivo, ver Figura 3. Este tipo de escáner no usa haz de luz continuo sino que utiliza pulsos de láser, esta propiedad de pulso le permite

obtener una buena señal de retorno a pesar de que existan condiciones de ruido en el ambiente. Algunos escáneres comerciales basados en esta tecnología son: Optech ILRIS-3D [10], Leica ScanStation C10 [11], Riegl (toda la gama) [12], Trimble VX [13], Callidus CP3200 [6], entre otros.

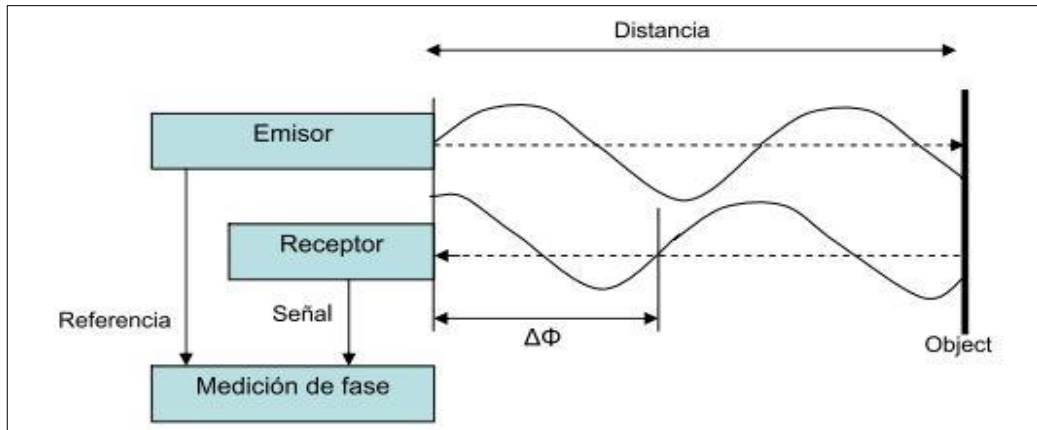
Figura 3. Principio de medición por tiempo de vuelo - TOF



Fuente: 3D RiskMapping – Teoría y práctica del Escaneado Láser Terrestre

El escáner PD calcula la distancia del objeto mediante la diferencia de fase de las formas de las ondas enviadas y de las retornadas, ver Figura 4; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** El láser emitido por este tipo de escáner es continuo y de potencia modulada. Algunos escáneres comerciales disponibles basados en esta tecnología son: Z+F Imager 5010 [14], Trimble FX [15], Leica HDS7000 [16], Faro Focus 3D [17], entre otros.

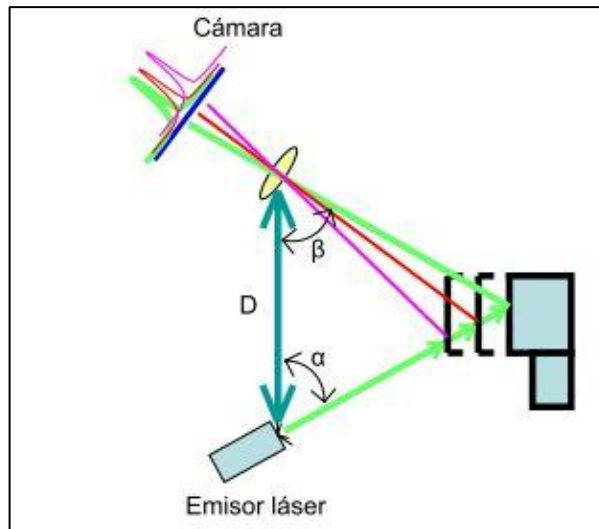
Figura 4. Principio de medición por diferencia de fase - PD



Fuente: 3D RiskMapping – Teoría y práctica del Escaneado Láser Terrestre

En el escáner láser basado en triangulación, también utiliza sensores activos que usan la luz de láser para explorar el entorno. El cálculo de la distancia al objetivo se hace mediante la determinación del tamaño del triángulo que forma el escáner, la cámara utilizada para ubicar el punto del láser en el objetivo y el objeto escaneado, ver Figura 5. Entre los escáneres comerciales basados en esta tecnología se encuentra el Minolta Vivid 910 [18].

Figura 5. Principio de medición por triangulación



Fuente: 3D RiskMapping – Teoría y práctica del Escaneado Láser Terrestre

4.1.1.2 Características técnicas. Actualmente existe en el mercado un amplio rango de TLS, donde cada uno posee especificaciones técnicas de acuerdo a la necesidad del usuario final. Las características más importantes que se deben tener en cuenta al momento de adquirir un TLS son: el alcance, la resolución del alcance, la precisión, la exactitud, el campo de visión, el tipo de láser, la clase, la longitud de onda, la velocidad de escaneo y la cantidad de puntos por segundo [6], [2].

El alcance mínimo y el máximo dependen del principio de operación del láser, esta medida se da en metros. La resolución del alcance hace referencia a la habilidad del escáner de distinguir entre las características adyacentes a la dirección del láser. La precisión es el grado de dispersión de un conjunto de mediciones sobre la media de esa cantidad. La exactitud es la cercanía de una medición respecto a su valor real. El campo de visión que se expresa en grados y describe el ángulo de un cono dentro del cual un objeto debe ser colocado, de tal manera que, el escáner sea capaz de tomar la muestra completa en un solo escaneo. La clase del láser es definido por el Instituto Nacional Americano de Estándares (ANSI – American National Standards Institute) como el grado de peligro para el ojo humano basado en la exposición máxima permisible (MPE) al rayo, esta clasificación del láser depende de su potencia y su longitud de onda. Las clases de láser que actualmente existen se representan en la Tabla 1.




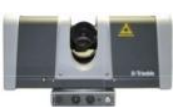

Tabla 1. Clasificación del láser según UNE EN 60825-1/A2-2002

Clase	Descripción
Clase 1	Seguros en condiciones razonables de utilización
Clase 1M	Como la Clase 1, pero no seguros cuando se miran a través de instrumentos ópticos como lupas o binoculares.
Clase 2	Láseres visibles (400 a 700 nm). Los reflejos de aversión protegen el ojo aunque se utilicen con instrumentos ópticos.
Clase 2M	Como la Clase 2, pero no seguros cuando se utilizan instrumentos ópticos.

Clase	Descripción
Clase 3R	Láseres cuya visión directa es potencialmente peligrosa pero el riesgo es menor y necesitan menos requisitos de fabricación y medidas de control que la Clase 3B.
Clase 3B	La visión directa del haz es siempre peligrosa, mientras que la reflexión difusa es normalmente segura.
Clase 4	La exposición directa de ojos y piel siempre es peligrosa y la reflexión difusa normalmente también. Pueden originar incendios

En la Tabla 2 se presenta una comparación de las diferentes características técnicas de algunos escáneres láseres terrestres más comerciales actualmente [12], [10], [11], [15], [17].

Tabla 2. Características técnicas de los escáneres láser terrestre más comerciales en la actualidad

Escáner/ Características	RIEGL VZ 400	OPTECH ILRIS 3D	Leica ScanStation C10	TRIMBLE FX	FARO Focus 3D
Tipo de Láser	Tiempo de Vuelo			Diferencia de Fase	
Mínimo Alcance	1,5 m	400 m	0,1 m	1,5 m	0,6 m
Máximo Alcance (con reflectancia)	600 m con 90% 280 m con 20%	400 m con 80% 1.200 m con 10%	300 m con 90% 134 m con 18%	80 m con 50% 45 m con 30%	120 m con 90%
Precisión	3 mm	8 mm	2 mm	0,8 mm	0,95 mm
Exactitud	2 mm	4 mm	6 mm	2 mm	2 mm (25 m)
Cantidad de ptos/seg	422.000ptos/seg	2.500ptos/seg	50.000ptos/seg	216.000ptos/seg	976.000ptos/seg
Velocidad de Escaneo Vertical	100 kHz	10 kHz	50 kHz	190 kHz	976 kHz
Angulo de Escaneo Vertical	60° (+30° / -30°)	40° (-20° / 20°)	370°	270°	305°
Angulo de Escaneo Horizontal	360°	(-40° / 40°)	360°	360°	360°
Clase	Clase 1	Clase 1M	Clase 3R	Clase 3R	Clase 3R
Almacenamiento	SSD 80 GB	puerto USB	SSD 80 GB		SD, SDHC 32GB
Imagen					

4.1.1.3 Modo de operación. Para realizar un levantamiento topográfico con el escáner láser terrestre es indispensable llevar a cabo una serie de etapas con el fin de obtener los mejores resultados, ya que algunos pasos que se requieren para el proceso de escaneo son automáticos y otros todavía demandan un trabajo manual.

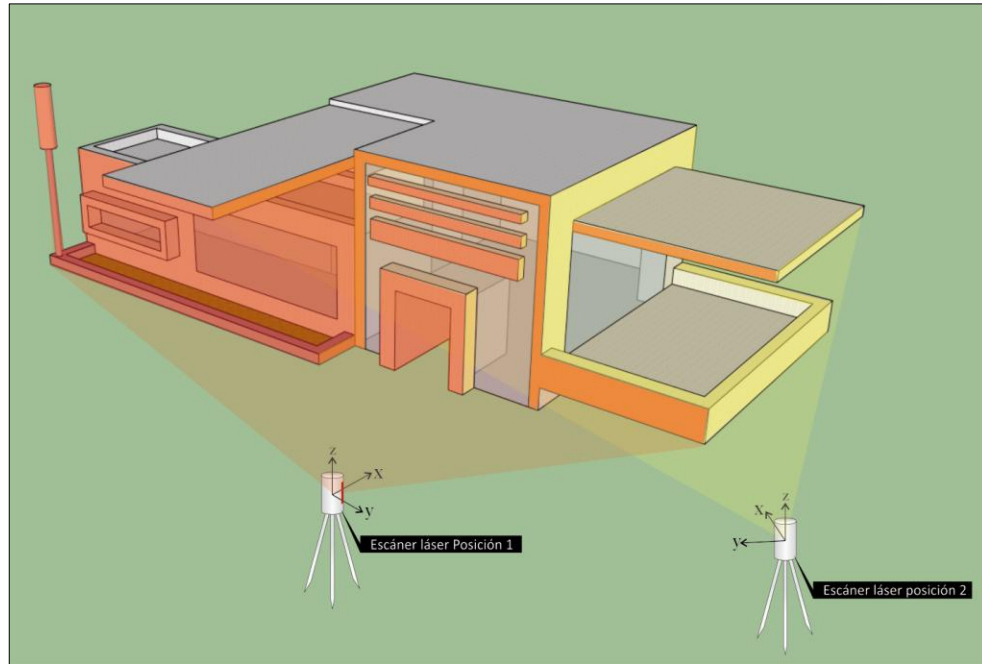
Las etapas para llevar a cabo el levantamiento topográfico son:

- **Planificación:** no existe un proceso estándar para hacer la planificación, sin embargo, se deben tener en cuenta como mínimo, los siguientes puntos:
 - *Determinar los objetivos*, con el fin de conocer los resultados que se necesitan del escaneo.
 - *Análisis del área a levantar*, para determinar la complejidad y el tiempo necesario para llevar a cabo el levantamiento.
 - *Determinar las posiciones óptimas de medición y el equipamiento*, con el fin de garantizar la máxima cobertura y precisión posible.
 - *Gestionar los datos*, para tener un estimado de la cantidad de espacio de almacenamiento de la información que se va a recolectar.

- **Trabajo en campo:** una vez ubicados en el área de trabajo se deben contemplar las siguientes recomendaciones:
 - *Preparación del levantamiento*, en esta fase incluye la toma de decisión de la técnica de registro a usar.
 - *Estacionamiento del escáner*, que corresponde a las actividades que se realizan para el ajuste del escáner, por ejemplo, montaje en el trípode, nivelación del escáner, configuración del escaneo, sistema de referencia, resolución, entre otros.

- **Captura de datos:** una vez tenido en cuenta los pasos anteriores se inicia el proceso de escaneo desde cada una de las posiciones donde se va a hacer el levantamiento de la información, como se visualiza en la Figura 6.

Figura 6. Esquema de escaneo de un objeto desde dos posiciones diferentes con cierto grado de traslapeo



Fuente: Evaluación del uso de un escáner láser terrestre y métodos tradicionales en la ejecución de un levantamiento topográfico

4.2 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Como resultado del escaneo a través del TLS se genera una alta densidad de puntos comúnmente llamada “nube de puntos”, cuya definición propuesta por el Dr. Jon Mills y David Barber en el 2003 fue, “*la nube de puntos es un conjunto de coordenadas XYZ en un sistema de referencia común, que muestra al espectador una comprensión de la distribución espacial de un objeto en el sitio. También se puede incluir información adicional como un valor de intensidad o un valor RGB*” [19].

El procesamiento de los datos recolectados hace referencia a la transformación de las nubes de puntos cruda en un resultado final deseado, ver Figura 7. Este

resultado puede variar en diferentes formatos: nube de puntos limpiada, planos 2D (de planta, de secciones transversales, de perfiles), modelos tridimensionales con texturas, entre otros.

Figura 7. a) Nube de puntos cruda. b) Nube de puntos con textura



Fuente: Elaboración propia

Una nube de puntos contiene dos tipos de información:

- **Métrica:** describe la geometría del objeto y muestra las relaciones espaciales entre los demás objetos del entorno.
- **Visual o temática:** que se usa para describir las propiedades de la superficie del objeto o para calcular la confiabilidad del rango de datos para cada punto.

El formato en que se almacena la nube de puntos depende del software del fabricante, algunos formatos contienen solamente la información espacial del punto (coordenadas X, Y, Z), mientras que otros guardan más información como: el valor de intensidad reflejado por el material del objeto escaneado, las normales de los puntos, la posición del escáner, el color del objeto en el modelo RGB, entre otros. Los formatos más comunes para el almacenamiento de nube de puntos son:

- XYZ: formato de texto no ordenado que contiene las coordenadas XYZ.

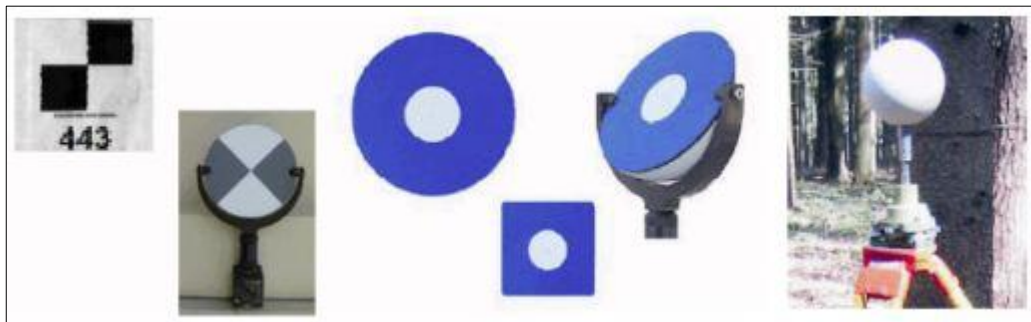
- LAS: es el formato binario estándar de información procedente de sistemas Lidar.
- ASCII: es un formato estándar que contiene información XYZ y valores de intensidad.
- PTX: formato de texto ordenado, que contiene las coordenadas XYZ, la reflectancia y el color.
- XYZRGB: formato de texto no ordenado que contiene las coordenadas XYZ y los valores de color RGB de cada punto.
- De acuerdo con el software de los fabricantes de escáneres terrestres, existen los siguientes formatos: RXP y RSP de Riegl, FLS y FLW de Faro, CLR y CL3 de Topcon, PTS y PTG de Leica.

Antes de procesar las nubes de puntos, los escaneados afectados por condiciones extremas del ambiente o los escaneados erróneos por fallos humanos se eliminan del conjunto de datos. En otros casos, en vez de eliminarse, se depuran aplicando una serie de filtros que permiten limpiar las nubes de puntos del ruido provocado por las malas condiciones ambientales. Este ruido se debe eliminar antes de realizar el proceso de registro, de lo contrario, afectará la precisión en el registro de las nubes de puntos.

4.2.1 Registro de las nubes de puntos. En la mayoría de los casos, los objetos que se van escanear son demasiados grandes o poseen formas muy complejas para que puedan ser capturados desde una sola posición, por esta razón, se necesita ubicar el escáner desde diferentes lugares (estacionamientos) con el fin de escanear el objeto completamente. Cada estacionamiento está definido en el sistema de coordenadas de la posición actual del escáner (coordenadas locales). Por lo tanto, para obtener una representación completa del objeto escaneado, las nubes de puntos deben ser transformadas a un sistema de coordenadas común o al sistema de coordenadas de algún estacionamiento en particular. Existen varios enfoques para el registro de nube de puntos:

- *Registro basado en puntos artificiales (dianas)*, son elementos fabricados con material reflectante para que puedan ser identificados más fácilmente dentro de la escena y así poder determinar con alto grado de exactitud sus centros dentro del sistema de coordenadas del registro, ver Figura 8. En la práctica, se recomienda tener al menos tres dianas con el sistema de coordenadas 3D conocido.

Figura 8. Tipos de dianas artificiales



Fuente: 3D RiskMapping – Teoría y práctica del Escaneado Láser Terrestre

- *Registro usando puntos naturales*, para el caso que no sea posible colocar las dianas debido a las condiciones de la escena, se utilizan diferentes puntos con características naturales que sean visibles dentro de la nube de puntos, por ejemplo, bordes de acero o esquinas de edificios. Después del escaneo, estos puntos naturales son usados como puntos de enlace que se pueden identificar manualmente en la nube de puntos o se escanean separadamente con una alta resolución para una mejor identificación. En la práctica se recomienda usar al menos cuatro puntos naturales.
- *Registro mediante emparejamiento de superficies*, consiste en alinear las nubes de puntos por medio de las superficies geométricas de los dos escaneos. Este algoritmo estima la distancia euclidiana entre fragmentos de superficies por mínimos cuadrados e intenta minimizar las distancias de forma iterativa.

4.2.2 Georreferenciación de la nube de puntos. Es el proceso de transformación de la nube de puntos registrada con el sistema de coordenadas del escáner, a un sistema de coordenadas externas (geodésicas) que pueden ser de ámbito local o global [19]. Actualmente existen diferentes técnicas para llevar a cabo este proceso y se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- *Georreferenciación indirecta*, basado en dianas que poseen un sistema de coordenadas geodésicas conocido y que permiten la transformación de las coordenadas de la nube de puntos al sistema de coordenadas de las dianas. Estas dianas son llamadas puntos de control y sus coordenadas pueden ser determinadas a través de un levantamiento topográfico con una estación total o con equipos *GPS* (*del inglés Global Positioning System*). Otra técnica de georreferenciación indirecta se basa en nubes pre-georreferenciadas, donde la nube de puntos se pone en alineación con el sistema de referencia de la nube pre-georreferenciada y mediante la aplicación del algoritmo llamado *ICP* (*del inglés Iterative Closest Point*), se determina el mejor emparejamiento de la nube de puntos con la nube pre-georreferenciada mediante la minimización de una función de distancia.
- *Georreferenciación directa*, en este método se establece el sistema de referencia geodésico directamente sobre el TLS al momento de realizar el escaneo. Esto se puede realizar de dos maneras: con la ubicación del escáner sobre un punto con sistema de coordenadas geodésicas conocidas o mediante el montaje del equipo GPS sobre el TLS. Comparado con el método de georreferenciación indirecta, este enfoque es más rápido y menos costoso, ya que no requiere de una estación total, ni tampoco necesita los puntos de control en la escena.

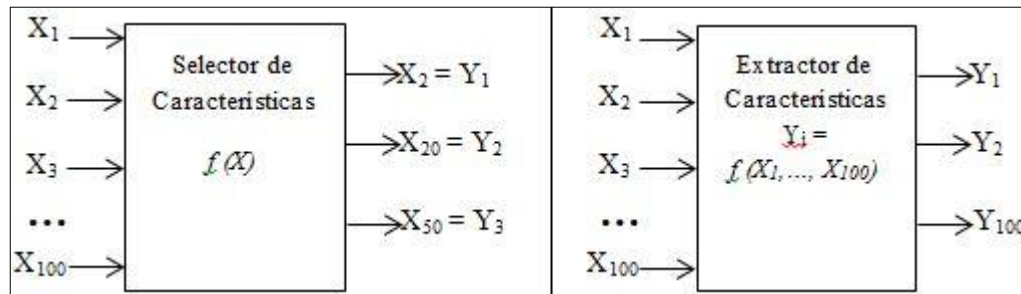
En la Tabla 3 se hace una comparación de las ventajas y desventajas que tienen los dos tipos de georreferenciación.

Tabla 3. Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de georreferenciación

Georreferenciación	Ventajas	Desventajas
Directa	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No es necesario la superposición entre múltiples escaneos. ▪ Los datos son georreferenciados en tiempo real sin necesidad de hacer un post-procesamiento. ▪ La calidad de los datos se puede verificar en campo directamente, lo que permite tomar decisiones rápidamente. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Menor precisión comparada con el enfoque indirecto. ▪ Si se hace un escaneo demasiado fino de la diana, el resultado de la georreferenciación se ve afectado por su reflectancia.
Indirecta	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta precisión proporcionada por la correcta configuración de las dianas. ▪ Los escaneos pueden hacerse desde diferentes puntos arbitrariamente. ▪ No es necesario centrar, nivelar ni medir la altura del escáner. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Para establecer los puntos de control con coordenadas conocidas, se hace necesario adquirir equipos adicionales como una estación total. ▪ Es necesario la superposición entre múltiples escaneos. ▪ La dificultad de poner en un buen lugar una diana debido a las extremas condiciones de algunas escenas (puentes, túneles, vías). ▪ Tiempo adicional para el post-procesamiento de la información.

4.2.3 Selección y Extracción de Características. El objetivo principal de la selección de características, es la elección de los atributos más relevantes de cada punto o segmento, con el fin de disminuir el número de características y eliminar la información redundante e irrelevante para el proceso de clasificación [20], ver Figura 9a. La selección de características en muchos casos es subjetiva y se consigue mediante técnicas de prueba y error, aunque también existen algunos métodos para llevar a cabo este proceso [21], [22], [23].

Figura 9. a) Selección de Características. b) Extracción de Características



Fuente: Statistical Pattern Recognition - Andrew Webb

La extracción de características tiene como objetivo la transformación del espacio de características de la nube de puntos original, en un nuevo espacio de características que resalte mejor la información relevante y remueva la redundante, ver Figura 9b. En algunos casos, la transformación conlleva a una reducción en la dimensión del espacio de características. Entre las técnicas más usadas se encuentran: el análisis de factores, el análisis de discriminantes lineales y el PCA (*del inglés Principal Component Analysis*) [24],[25]. Éste último es el más usado y hace una descomposición en vectores y valores propios de la matriz de covarianza, para obtener tanto la orientación local de un vecindario de puntos como la variación en las direcciones principales [24], [26]. Algunas aplicaciones que han utilizado el PCA en el procesamiento de la nube de puntos han incluido la aproximación de la dirección de la normal [27], [28], el ajuste de superficies planas [29] y la aproximación de la curvatura de una superficie [30]. Otros trabajos han

utilizado el PCA para la detección de postes como en [31], [32], [33], o para la detección de los elementos urbanos [34], [35]. Las características más comunes que se utilizan en los métodos de extracción son [36], [37], [38], [39]:

- **Características geométricas:** *el tamaño:* es la característica más distintiva y hace referencia a la longitud, ancho, altura, área y volumen. Por ejemplo, en las fachadas, las paredes o puertas se pueden distinguir fácilmente de otros objetos por su tamaño. *La posición:* algunos objetos se esperan que se encuentren en cierta posición con respecto a la escena. Por ejemplo, las ventanas y puertas siempre se encuentran sobre la pared, mientras que el techo siempre se encuentra en la parte superior. *La orientación:* esta característica generalmente puede ser predecible en los objetos. Por ejemplo, las paredes siempre se encuentran en forma vertical, mientras que la superficie del terreno es horizontal. *La densidad:* en el caso de las ventanas, el pulso del láser penetra el vidrio y difícilmente retorna la información, produciendo una muy baja densidad de puntos dentro estas áreas. Otras características importantes son: el perímetro, la densidad y la forma geométrica.
- **Características radiométricas:** son las que están asociadas con el valor del porcentaje de intensidad del pulso retornado. Algunos TLS también pueden capturan imágenes, lo que permite asociar la información espectral a cada punto de la nube.
- **Características topológicas:** tienen que ver con la relación espacial que existe entre los segmentos, que puede ser definida por la adyacencia y conectividad que existen entre ellos. Por ejemplo, el terreno y el techo siempre se intersectan con las paredes.

Otras características importantes a nivel del punto son: la reflectancia del pulso láser, el ancho del pulso [40], y la información espectral obtenida de imágenes

digitales tomadas con una cámara [41], mientras que a nivel del segmento se encuentran: la altura promedio, el volumen estimado, la desviación estándar, la cantidad de puntos en un segmento y el porcentaje de puntos del último eco [42].

4.2.4 Segmentación de la nube de puntos. La segmentación puede definirse como el proceso de etiquetado de cada punto en la nube de puntos donde los que pertenecen a la misma superficie o región se les asigna la misma etiqueta [43], en otras palabras, es el proceso de agrupar espacialmente puntos de una nube de puntos que contengan características similares dentro de regiones homogéneas comúnmente llamadas *segmentos*. Cada segmento es un subconjunto cerrado de la nube de puntos y cada punto pertenece sólo a un segmento y no hay dos segmentos que tengan puntos en común. En [24] se define la segmentación como:

$$\Theta P = \{\Theta p \mid \forall p \in P\}$$

Donde ΘP es la operación de segmentación en la nube de puntos P , y Θp es la etiqueta asignada a un solo punto p en P . El resultado de la segmentación son segmentos, s , que tienen las siguientes propiedades:

1. $S = \{s \mid s \subset P\}$
2. $\Theta P \Rightarrow S$
3. $\cup s_i = P$, donde $|s_i| > 0$
4. $s_i \cap s_j = \emptyset$, donde $i \neq j$

Existen varios métodos para la segmentación de nube de puntos que se pueden clasificar en los siguientes grupos:

4.2.4.1 Segmentación basada en la detección de bordes. Este método detecta discontinuidades en las superficies que se forman cerca de los límites de los objetos contenidos en la nube de puntos, por lo tanto, la segmentación se realiza primero mediante la identificación de la extensión de la superficie que está

determinada por los bordes y las intersecciones, en donde todos los puntos que se localizan dentro de la frontera se consideran que pertenecen a una misma región [44]. El desempeño de este tipo de segmentación está determinado por el detector de bordes [24], [45]. El enfoque más simple para la detección de bordes, es estimar una superficie plana dentro del vecindario alrededor de un punto de interés para determinar el valor de la normal de esta superficie [46], este proceso comúnmente se realiza a través del método PCA [47] o mediante regresión de Mínimos Cuadrados [48]. Por lo tanto, la variación en la dirección de la normal de la superficie proporciona un indicador del nivel de curvatura o cambio de la superficie local que permite identificar los bordes [30].

4.2.4.2 Segmentación basada en el crecimiento de regiones. Esta técnica consiste en detectar superficies continuas que tengan propiedades geométricas similares [49]. El proceso comienza examinando un punto semilla que se asocia a un segmento que va creciendo mediante la inspección de los demás puntos alrededor de este punto semilla, el crecimiento se inicia a partir del punto más cercano hasta que se agoten los demás puntos candidatos, ya sea por eliminación de ellos o por la inclusión dentro de un segmento [50], [51], [36]. El trabajo presentado en [52] proporciona una comparación de métodos de segmentación para encontrar superficies planas. En [43] presenta un método que consiste en dos pasos: estimación de la normal de la superficie local mediante los k-vecinos más cercanos y el crecimiento de regiones que se ejecuta usando las normales de los puntos estimados, en esta fase los puntos son agregados al segmento mediante una medida de proximidad y un criterio de suavidad de la superficie.

4.2.4.3 Segmentación basada en la agrupación de características (*Clustering*). En este tipo de segmentación, cada punto es asociado a un vector que contiene las mediciones de sus propiedades geométricas y radiométricas comúnmente llamadas *características* [51] (ej. coordenadas XYZ, la normal de la superficie local, el valor de reflectancia, el valor RGB del objeto). Esas

características son representadas en un sistema de coordenadas de n -dimensiones [24], donde los puntos se agrupan en regiones compactas y separadas, comúnmente llamadas *clústeres*. En [53] se define un vector de características de siete dimensiones, luego, mediante el algoritmo de modo de búsqueda que permite identificar los tipos de superficies de los segmentos, luego estos puntos son agrupados con base a una medida de proximidad. En [54] se aplica un algoritmo jerárquico usando el método PCA sobre las n características formando un espacio de cinco dimensiones. Algunas de las características usadas son: el momento estático, la curvatura y la reflectancia.

Otro método importante dentro de este tipo de segmentación es el basado en grafos, que comienza con la implementación de un grafo de atributos $G(V, E_A)$ de una nube de puntos V y los atributos de las aristas E_A están basadas sobre las medidas de proximidad. En [55] se usa un grafo de árbol llamado *MST* (*del inglés Minimum Spanning Tree*) y define las aristas que no cumplen con un criterio de proximidad, como aquellas cuyos pesos son significativamente más grandes que el promedio de los pesos de las aristas más cercanas. En [56] presenta un nuevo método basado en grafos para la segmentación de puntos, donde cada nodo es conectado a todos los vecinos que se encuentren dentro de un radio predefinido, la principal ventaja de este método es que es computacionalmente menos costoso que los demás algoritmos basados en grafos, ya que no hace una búsqueda sobre todos sus vecinos cada vez que está examinando algún nodo en particular, sino que la búsqueda la realiza solamente en los vecinos que se encuentran dentro del radio definido.

4.2.4.4 Segmentación basada en la línea de escaneo. Esta técnica adopta la estrategia de división-y-unión, en donde la nube de puntos es dividida en líneas de escaneo a lo largo de una dirección [45]. Estas líneas son divididas de forma recursiva e independiente en segmentos de líneas rectas, hasta que la distancia perpendicular de los puntos a su correspondiente segmento de línea esté por

debajo de un umbral definido. Posteriormente, los segmentos de líneas de escaneo son unidos basados en alguna medida de similitud mediante el método de crecimiento de regiones [57]. En [4] se describe un método de segmentación que agrupa puntos de líneas de escaneo basado en una medida de proximidad, estos grupos no necesitan corresponder a una secuencia de puntos en la línea de escaneo, por lo tanto, todos los puntos están presentes en cada conjunto de líneas de escaneo y varios de ellos tendrán diferente orientación, esta propiedad es usada para unir estos segmentos de líneas en regiones.

4.2.4.5 Segmentación mediante el ajuste a un modelo. Este tipo de segmentación se basa en la premisa de que los objetos hechos por el hombre pueden ser escaneados y se pueden descomponer en primitivas geométricas tales como, planos, cilindros y esferas [58]. Este enfoque intenta ajustar formas geométricas en la nube de puntos, por lo tanto, aquellos puntos que se ajusten a la representación matemática de alguna forma geométrica, son etiquetados como pertenecientes a un segmento. Entre los métodos para la estimación de parámetros que permiten la extracción de formas geométricas dentro de una nube de puntos se destacan la Transformada de Hough 3D [5], [38], [50] y el *RANSAC* (del inglés *Random Sample Consensus*) [58], [59], [60].

4.2.4.6 Otros métodos de segmentación. Un enfoque importante es la segmentación basada en *voxels*. Este método convierte la nube de puntos en una malla tridimensional, donde las celdas que conforman esta malla son pequeños cubos llamados “voxels” (Volume Elements), que es similar al concepto de los pixeles (Picture Elements) en el caso de dos dimensiones. El algoritmo propuesto en [61] inicia con la conversión de la nube de puntos a un raster 3D, el siguiente paso es el proceso de *esqueletonización*, que consiste en la remoción iterativa de voxels que conforman el objeto, con el fin de dejar al descubierto los componentes que conforman su estructura y las relaciones topológicas entre ellos. Finalmente, la segmentación se hace sobre los esqueletos de los objetos y de nuevo se hace

la transformación pero esta vez de voxels segmentados a nube de puntos segmentada.

La segmentación es una etapa importante aunque no necesaria [62] para el siguiente paso que consiste en la clasificación de los objetos, ya que permite identificar los segmentos claves y reducir el ruido en los datos, con el fin de obtener un mejor desempeño en los algoritmos de clasificación. Sin embargo, en otras investigaciones la etapa de clasificación se realiza antes de la segmentación [44].

4.2.5 Clasificación de objetos en nube de puntos. El reconocimiento y clasificación de objetos contenidos dentro de una nube de puntos consiste en la separación de los puntos en diferentes clases que han sido definidas previamente (ej. edificaciones, vegetación, terreno, etc.), mediante la evaluación de sus características intrínsecas o naturales, donde para cada clase existe un conocimiento previo sobre su naturaleza [2]. Para el caso de los elementos que conforman un entorno urbano, los objetos poseen un número de rasgos distintivos y organizados de manera jerárquica dentro de cualquier escena, ver Figura 10. La mayoría de los trabajos realizados con datos de un TLS se han enfocado en el reconocimiento de fachadas de edificios [36], [38],[63], mientras que otros se han orientado más en la detección de elementos de las vías [31],[35],[39],[64]. Con base en los tipos de características, la clasificación se puede categorizar en [44]:

Figura 10. Categoría genérica de objetos en un escenario urbano escaneado



Fuente: Recognizing basic structures from mobile laser scanning data for road inventory studies - Shi Pu

4.2.5.1 Clasificación basada en las características radiométricas. Este tipo de clasificación se basa en la información espectral de cada punto (intensidad del pulso o color) que depende de las propiedades de cualquier superficie como su reflectancia, textura, el ángulo de incidencia, así como de las especificaciones del escáner [65],[66]. En [67] se utiliza el valor de intensidad para la clasificación de superficies continuas, ya que permite la diferenciación entre los elementos que conforman las fachadas. Otros trabajos se han concentrado en combinar la información de color de imágenes 2D con la nube de puntos 3D [68],[69].

4.2.5.2 Clasificación basada en las características geométricas. Este tipo de clasificación se basa en la información geométrica derivada de las coordenadas 3D de los puntos, este tipo de información es común para todas las nubes de puntos independientemente del TLS que se use o de la configuración que tenga el dispositivo, por lo tanto, es el tipo de clasificación más usado.

En [50] se presenta una vista general de las diferentes técnicas para la extracción de superficies planas, cilíndricas y esféricas en nubes de puntos, con base en los

parámetros de cada una de estas formas geométricas. En [39] se presenta un trabajo basado en la técnica de detección de forma para la localización de señales de tránsito, que inicia con una segmentación mediante el crecimiento de regiones [50]. Luego, se extraen las características basadas en el enfoque propuesto en [38], [63] y finalmente, cada segmento es ajustado a una envolvente convexa con el fin de comparar su área con las áreas de las señales de tránsito en estudio (rectangular, triangular y circular) y realizar el proceso de clasificación.

En [36] se presenta un enfoque automático para la extracción de objetos de las fachadas dentro de una nube de puntos. Inicialmente, se definen las clases que conforman las fachadas de las edificaciones (pared, puerta, ventana, techo, salientes y entrantes). Después se aplican algoritmos de segmentación para agrupar las superficies planas. Luego, se extraen las características más relevantes de cada segmento y se establecen sus restricciones basadas en el conocimiento humano. Cada segmento es ajustado a una envolvente convexa con el fin de definir los rangos de valores de las características. Finalmente, el proceso de clasificación confronta cada segmento a través de las restricciones de las características para determinar la clase a la cual pertenece [38].

Una técnica para la detección de múltiples objetos en un entorno urbano fue presentado en [70], este algoritmo inicia con la localización potencial de los objetos basado en la alta densidad de puntos, después se aplica un método de segmentación para remover los puntos del terreno. La extracción de características se lleva a cabo con base en la forma y el contexto. Y en la etapa de clasificación, cada vector de características del objeto candidato es clasificado con respecto a un conjunto de entrenamiento etiquetado manualmente.

En la tesis presentada en [44] se realiza un proceso de clasificación a nivel de punto. Basado en las características geométricas, los puntos fueron etiquetados en tres clases: superficie, frontera y borde. Esta clasificación se llevó a cabo con

base en las propiedades algebraicas de continuidad y diferenciabilidad de los segmentos de las superficies, mediante algoritmos del vecindario más cercano y varianza de la curvatura del vecindario [71].

El trabajo presentado en [62], se basa en la detección y reconocimiento de objetos pequeños y compactos de un entorno urbano (ej. carros, señales de tránsito y lámparas). El proceso inicia con el filtrado de los puntos del terreno mediante el algoritmo de RANSAC, luego, se extraen grupos de puntos llamados *componentes conectados*, los cuales se consideran como potenciales objetos. Después se evalúan las características de cada componente (ej. altura, volumen, descriptor *spin-image*) y finalmente, se aplica un algoritmo de clasificación supervisada llamado *ISM (Implicit Shape Models)*, que reconoce los objetos mediante un sistema de votación de las localizaciones de sus centros.

Otro tipo de clasificación de nubes de puntos está basado en el enfoque estadístico [72], donde los parámetros del modelo y las probabilidades a posteriori son estimadas mediante el ajuste de un modelo Gaussiano mixto usando el algoritmo *EM (Expectation Maximization)*. En la fase de análisis de características se detectaron tres tipos de objetos en el entorno urbano: los objetos hechos por el hombre, que generalmente son superficies planas o cilíndricas con algún valor de reflectancia (ej. edificaciones y postes de luz). Los objetos naturales, que son superficies irregulares con poca reflectancia (ej. los árboles, el suelo). Finalmente, los objetos dinámicos, tales como los peatones y vehículos, generalmente son de pequeña altura y obstruyen a los dos tipos de objetos anteriores.

4.2.6 Generación de modelos tridimensionales. Los modelos tridimensionales generados a partir de los datos de un escáner láser [73], presentan un alto grado de precisión en comparación con los modelos que se diseñan con las medidas geométricas levantadas en campo de forma manual. Aunque existen aplicaciones comerciales para la transformación de la nube de puntos en modelos sólidos,

muchos de los procesos tienen significativas limitaciones tales como, la dependencia de geometrías pre-establecidas que no reflejan suficientemente la geometría de una edificación, la dependencia de un programa basado en dibujo asistido por computador (*CAD del inglés Compute Aided Drawing*) y la incapacidad de operar de manera óptima con datos dispersos e información faltante [3]. Existen dos enfoques dominantes que son:

4.2.6.1 Geometría sólida constructiva – CSG (Constructive Solid Geometry).

En este enfoque se construyen los modelos a partir de una serie de sólidos primitivos simples (caja, esfera, cilindro y aros) y de operaciones booleanas como: unión, intersección y diferencia [3], ver Figura 11. El proceso de construcción de los modelos tridimensionales se realiza en forma de árbol llamado *CSG-Tree*, donde los sólidos primitivos simples son las hojas y las operaciones booleanas se almacenan como nodos interiores [74].

Figura 11. Primitivas para sistemas de modelado de sólidos

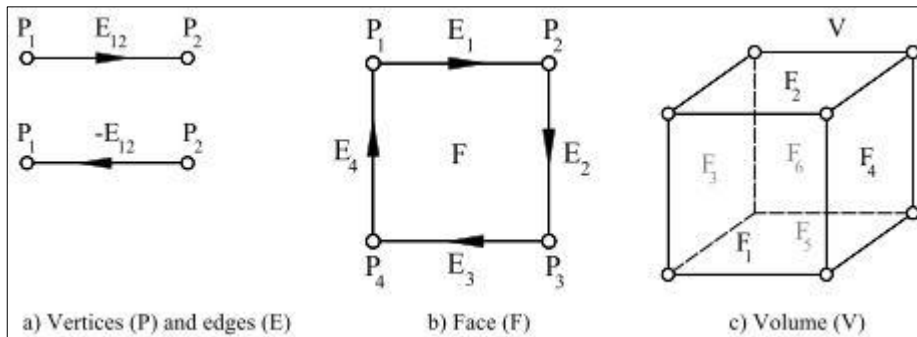


Fuente: Processing of terrestrial laser scanning point cloud data for computational modeling of building facades – Debra Laefer

4.2.6.2 Representación de fronteras - B-rep (Boundary Representation).

En este enfoque la estructura geométrica consta de vértices, curvas y superficies junto con los datos numéricos que describen la posición, el tamaño y la orientación, ver Figura 12. Mientras que la estructura topológica de los modelos adyacentes consta de vértices, aristas y caras, junto con punteros que almacenan la información de la conectividad [75], [74].

Figura 12. Etiquetado y organización de vértices, aristas y caras d B-rep cúbica



Fuente: Processing of terrestrial laser scanning point cloud data for computational modeling of building facades – Debra Laefer

Un trabajo basado en el enfoque B-rep para la reconstrucción de superficies, se presenta en [76] denominado *Marching Cubes*, el proceso inicia con la subdivisión del espacio de coordenadas en voxels, aquellos voxels que contengan algún elemento de la superficie son remplazados con una serie de triángulos alrededor de los puntos hasta formar polígonos. Después, se realiza la unión de los cubos adyacentes a través de sus vértices vecinos para producir la malla poligonal de la superficie. Otro trabajo presentado en [77], se basa en la aproximación de la conectividad de grafos a partir del modelo *HSDM (Hierarchical Space Decomposition Model)* y la reconstrucción de caras. El proceso se divide en las siguientes etapas: construcción del HSDM a partir de la nube de puntos, extracción de superficie mediante la conectividad de grafos, la reconstrucción de caras y finalmente, la reconstrucción de la malla y su extensión mediante la incorporación de los vectores normales.

Otro enfoque para la reconstrucción de superficies está basado en la triangulación de Delaunay, que consiste en la generación de una red irregular de triángulos (*TIN*) a partir de los todos puntos de la escena. El trabajo presentado en [78] para la detección de ventanas, inicia con la generación de un TIN para los segmentos de la fachada, como las ventanas presentan menor densidad de puntos entonces

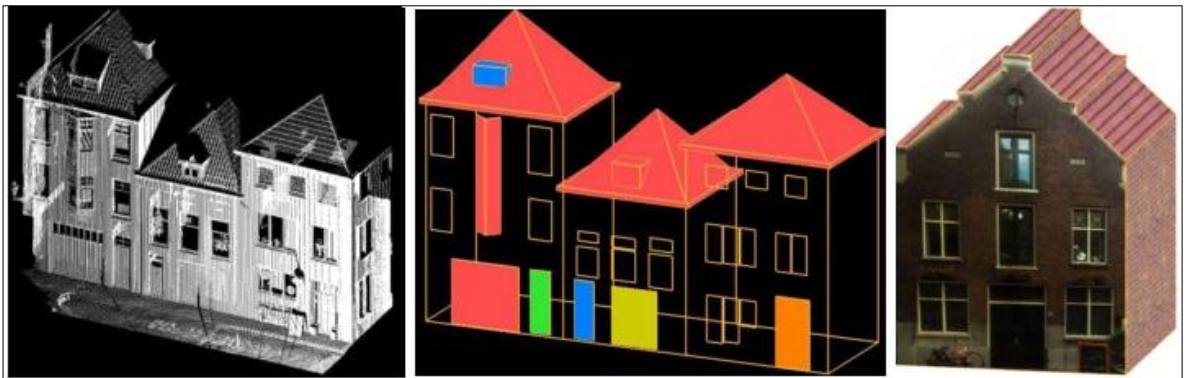
los triángulos son más grandes en esa área, esta característica permite detectar estos segmentos más fácilmente para luego ser ajustados a un rectángulo mínimo delimitante. En [38],[79] se presenta un enfoque para la generación automática de modelos de edificaciones mediante ajuste a polígonos. En su etapa de modelado, los objetos reconocidos son ajustados directamente a polígonos convexos mediante los métodos: *QuickHull* [80], mínimos cuadrados o transformada de Hough [50]. En las partes ocultas de las edificaciones, se hacen suposiciones a partir de las partes visibles y del conocimiento acerca de las mismas y luego se completa el modelo mediante la combinación de los polígonos ajustados y las suposiciones de las partes ocultas. En [63] se da un toque más real a los modelos tridimensionales, con la ejecución de un método para la aplicación de color y textura a partir de imágenes digitales, tal como se visualiza en la Figura 13.

Figura 13. Generación de modelos tridimensionales con textura

a) Nube de puntos

b) Modelo 3D

c) Modelo 3D con textura



Fuente: Building facade reconstruction by fusing terrestrial laser points and images - Shi Pu

En [81] se propone un método para reconstruir una malla mediante la triangulación de superficies a partir del vecindario de un conjunto de puntos, aplicando el método de mínimos cuadrados. Esta triangulación se propaga hasta que no existan más puntos libres de manera similar a la técnica de crecimiento de regiones.

Actualmente, existen en el mercado algunas herramientas comerciales de software para la transformación de nube de puntos en superficies o modelos sólidos, estas aplicaciones se pueden clasificar en dos categorías: las que dependen de un software intermediario CAD o comúnmente llamado “Add-On” para plataformas CAD y las aplicaciones independientes [82]. Los tipos de archivos de salida de estas aplicaciones son: DXF, SAT, STEP, STL, IGES, entre otros. A pesar de que estas aplicaciones facilitan la construcción de un modelo, aún presenta varias desventajas tales como, el consumo considerable de tiempo, ya que no se puede generar un modelo satisfactorio sin algún grado de post-procesamiento manual [83], [84].

4.3. CITYGML

CityGML es un modelo común de información semántica para la representación de objetos urbanos en 3D, que pueden ser compartidos a través de diferentes aplicaciones. Las áreas de aplicación específicas incluyen la planificación urbana, diseño arquitectónico, las actividades turísticas y de ocio, la simulación del medio ambiente, las telecomunicaciones móviles, la gestión de desastres, administración de bienes inmuebles, tráfico de vehículos y peatones, y simuladores.

CityGML está diseñado como un modelo de datos abierto y está basado en el formato XML para el almacenamiento y el intercambio de modelos virtuales de ciudades en 3D. Se implementa como un esquema de aplicación de Geography Markup Language 3 (GML3), el estándar internacional para el intercambio extensible de datos espaciales, la codificación emitida por el Open Geospatial Consortium (OGC) y la ISO TC211. CityGML se basa en una serie de normas de la familia ISO 191xx, el Open Geospatial Consortium, el Consorcio W3C, el Consorcio de la Web en 3D, y OASIS [85].

CityGML define las clases y relaciones para la topografía más relevante de los objetos en modelos de ciudades y regiones con respecto a su geometría, topología, semántica y propiedades de apariencia. La definición de ciudad no sólo comprende las construcciones sino también la elevación, vegetación, cuerpos de agua, mobiliario urbano “city furniture”, entre otros. CityGML es aplicable tanto para grandes áreas como para pequeñas regiones y puede representar el terreno y objetos 3D en diferentes niveles de detalle simultáneamente.

CityGML se implementa como un esquema de aplicación de la versión 3.1.1 Geography Markup Language (GML3), cuyas características más importantes son [85]:

- Modelo de información geoespacial para paisajes urbanos basándose en la familia ISO 19xx.
- Representación GML3 de geometrías 3D basada en el modelo ISO 19107.
- Representación de las características de la superficie del objeto (textura, materiales, entre otros).

- Taxonomías y agregaciones
 - Modelos digitales de terreno como una combinación de redes TIN, rasters regulares, líneas de ruptura y esqueleto, masas de puntos.
 - Sitios. (construcciones, puentes, túneles).
 - Vegetación.
 - Cuerpos de agua.
 - Transporte.
 - Uso de la tierra.
 - Mobiliario urbano
 - Objetos y atributos genéricos de ciudades.
 - Agrupamiento determinado por el usuario.

- Modelo multi-escala con 5 niveles consecutivos de detalle o LOD (Level of Detail):
 - *LOD0*: grandes regiones, grandes paisajes.
 - *LOD1*: municipios.
 - *LOD2*: casco urbanos, proyectos de construcción.
 - *LOD3*: Modelos arquitectónicos de exteriores.
 - *LOD4*: Modelos arquitectónicos de interiores
- Múltiples representaciones en diferentes niveles de detalle simultáneamente, relaciones de generalización entre objetos en diferentes LODs.
- Conexiones topológicas opcionales entre características geométricas.
- Extensiones de dominios de aplicación (ADE).

4.3.1 Visión general de CityGML. El objetivo del desarrollo de CityGML es llegar a una definición común de las entidades básicas, atributos y relaciones de un modelo de ciudad en 3D. Este modelo no solamente representa el aspecto gráfico de los modelos de ciudades sino que también a las propiedades semánticas y temáticas, a las taxonomías y agregaciones, por esta razón, incluye un modelo geométrico y un modelo temático. El modelo geométrico permite la definición consistente y homogénea de las propiedades geométricas y topológicas de los objetos espaciales dentro de los modelos de ciudades 3D. El modelo temático usa el modelo geométrico para diferentes áreas temáticas como los modelos digitales del terreno, construcciones, vegetación, cuerpos de agua, transporte y mobiliario urbano.

Los demás objetos que aún no se han modelado explícitamente pueden ser representados usando el concepto de objetos y atributos genéricos. Los objetos espaciales que tienen formas iguales y que aparecen muchas veces pero con diferentes posiciones como por ejemplo los árboles, pueden ser modelados como prototipos y usados varias veces en el modelo de ciudad. El concepto de

agrupación permite la combinación de objetos 3D sencillos, ejemplo un edificio, a objetos complejos como un conjunto de residencial de edificios.

CityGML distingue cinco niveles consecutivos de detalles (LOD) donde los objetos se vuelven más detallados cuando aumenta su nivel de LOD con respecto a su geometría y su diferenciación temática.

4.3.2 Notación UML. De acuerdo a GML3 todas las asociaciones entre los elementos del modelo en CityGML son unidireccionales. Los estereotipos más usados son:

- *<<Geometry>>*, representa la geometría de un objeto. La geometría es un objeto identificable y distinguible que es derivado del tipo abstracto GML *AbstractGeometryType*.
- *<<Feature>>*, representa una característica temática de acuerdo a la definición en la norma ISO 19109. Una característica es un objeto identificable y distinguible que es derivado del tipo abstracto GML *AbstractFeatureType*.
- *<<Object>>*, representa un objeto identificable y distinguible que es derivado del tipo abstracto GML *AbstractGMLType*.
- *<<CodeList>>*, enumera los valores de atributos válidos.
- *<<Union>>*, es una lista de atributos. La semántica indica que sólo uno de los atributos puede ser presentado en cualquier momento.
- *<<PrimitiveType>>*, usado para representaciones soportadas por un tipo primitivo en la implementación.
- *<<DataType>>*, se utiliza como un descriptor de un conjunto de valores que carecen de identidad. Los tipos de datos incluyen tipos predefinidos de primitivas y tipos definidos por el usuario.
- *<<Leaf>>*, usado dentro del paquete de diagramas UML para indicar los elementos del modelo que no pueden tener más subtipos.

- <<*XSDSchema*>>, se utiliza dentro del paquete de diagramas UML para referirse al elemento raíz de un esquema XSD que contiene todas las definiciones para un espacio de nombres en particular.
- <<*ApplicationSchema*>>, usado dentro del paquete de diagramas UML para referirse a la definición fundamental de un esquema XML dependiendo de los conceptos de otro estándar independiente dentro del metalenguaje de esquema XML.

4.3.3 Espacios de nombres y Módulos de CityGML El modelo de datos CityGML esta temáticamente compuesto de un módulo principal (core module) y módulos de extensión temáticos. Todos los módulos están especificados por su propio archivo de esquema XML, cada uno definido en un espacio de nombres globalmente único. El core de CityGML y los módulos de extensión con su respectivo espacio de nombres XML junto con su prefijo se visualizan en la Tabla 4.

Tabla 4. Lista de módulos con su identificadores de espacios de nombres y ejemplos de los prefijos

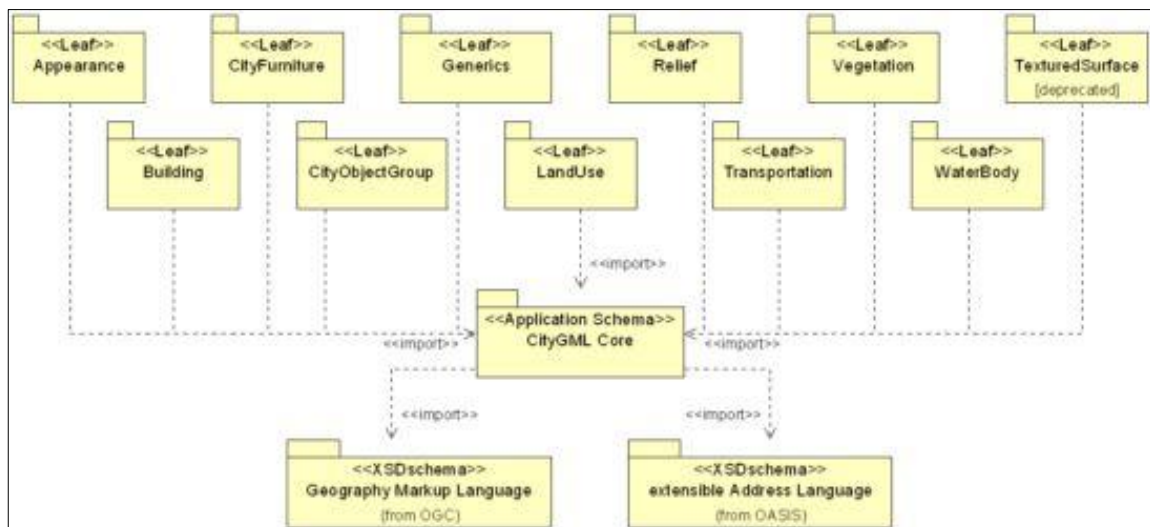
Módulo CityGML	Identificador del espacio de nombres	Prefijo del espacio de nombres
CityGML Core	http://opengis.ent/citygml/1.0	core
Appearance	http://opengis.ent/citygml/appearance/1.0	app
Building	http://opengis.ent/citygml/building/1.0	bldg
CityFurniture	http://opengis.ent/citygml/cityfurniture/1.0	frn
CityObjectGroup	http://opengis.ent/citygml/cityobjectgroup/1.0	grp
Generics	http://opengis.ent/citygml/generics/1.0	gen
LandUse	http://opengis.ent/citygml/landuse/1.0	luse
Relief	http://opengis.ent/citygml/relief/1.0	dem
Transportation	http://opengis.ent/citygml/transportation/1.0	tran
Vegetation	http://opengis.ent/citygml/vegetation/1.0	veg
WaterBody	http://opengis.ent/citygml/waterbody/1.0	atr
TextureSurfaced	http://opengis.ent/citygml/texturedsurface/1.0	tex

4.3.4 Características generales

4.3.4.1 Modularidad. El modelo de datos CityGML consiste en definiciones de clases para los tipos de objetos más importantes dentro del modelo de ciudad virtual 3D. Estas clases han sido identificadas como las más importantes en muchas áreas de aplicación.

El modelo de datos de CityGML es temáticamente descompuesto en un módulo *core* y módulos de *extensión* temáticos. Basado en el módulo *core*, cada extensión cubre un campo temático específico de los modelos virtuales de ciudades 3D. CityGML introduce once módulos temáticos de extensión, ver Figura 14: *Appearance*, *Building*, *CityFurniture*, *CityObjectGroup*, *Generics*, *LandUse*, *Relief*, *Transportation*, *Vegetation*, *WaterBody* y *TexturedSurface*.

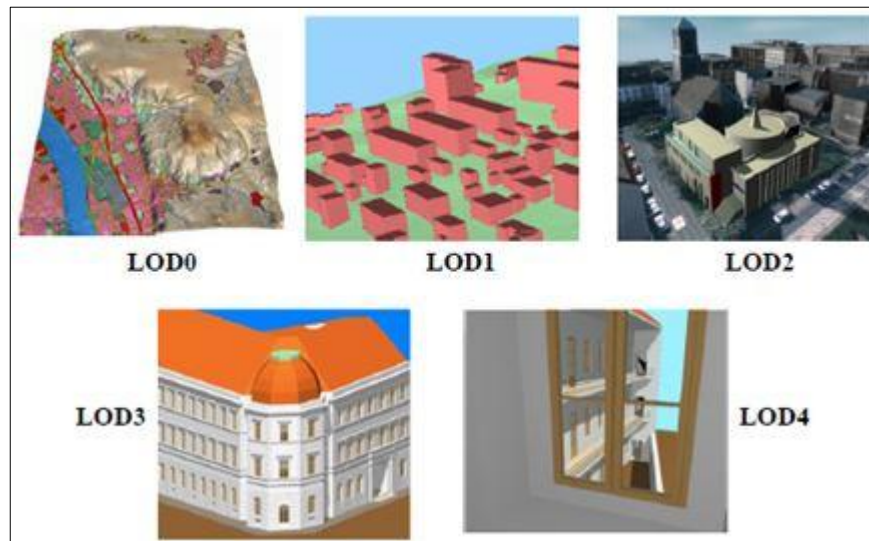
Figura 14. Diagrama UML de Paquetes de los módulos de CityGML y sus esquemas independientes



Fuente: OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard - Gerard Gröger

4.3.4.2 Modelado multiescala (cinco niveles de detalle - LOD). Los niveles de detalle se utilizan para reflejar la independencia entre el proceso de recolección de los datos y las diferentes aplicaciones en que se puedan usar. Por lo tanto, facilitan la visualización eficiente y el análisis de los datos, ver Figura 15. Con CityGML un mismo objeto puede ser representado en diferentes niveles de detalle simultáneamente, permitiendo el análisis y visualización del mismo objeto en diferentes grados de resolución.

Figura 15. Niveles de detalle - LOD definidos por CityGML



Fuente: OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard - Gerard Gröger

4.3.4.3 Modelado semántico-geométrico coherente. Uno de los principios más importantes de CityGML es el modelado coherente de las propiedades semánticas, geométricas y topológicas. Por lo tanto, cualquier modelo está conformado por dos jerarquías: la semántica y la geométrica en donde los objetos están enlazado por sus relaciones. Por ejemplo, si una pared de un edificio tiene dos ventanas y una puerta en el nivel semántico, entonces la representación geométrica de la pared debe contener también las piezas geométricas de las dos ventanas y la puerta.

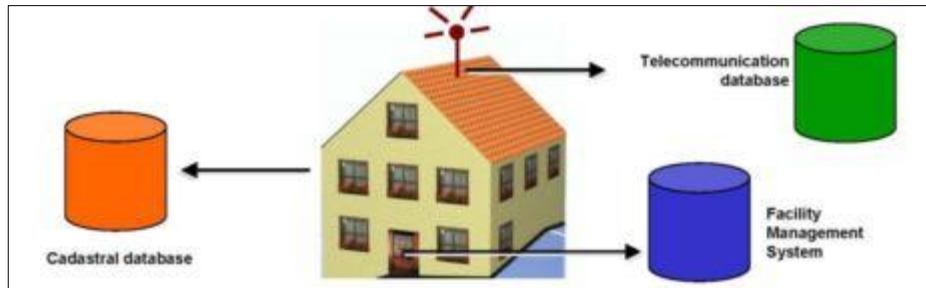
4.3.4.4 Superficies de cierre. Los objetos que no son modelados mediante geometría volumétrica, debe ser virtualmente cerrados con el fin de calcular su volumen, por ejemplo, las entradas a las estaciones de trenes subterráneos, hangares de aviones, entre otros.

4.3.4.5 Curvas de intersección del terreno. Esta característica trata sobre la integración de los objetos 3D con el terreno, ya que un modelado tridimensional erróneo puede tener la apariencia de que los objetos 3D se encuentren flotando o hundidos dentro del terreno. Este caso ocurre cuando los objetos 3D con diferentes niveles de detalle se combinan con el terreno o cuando los modelos provienen de diferentes proveedores [86].

4.3.4.6 Diccionarios y lista de códigos externa. CityGML contiene un diccionario donde están implementados todas las listas de código de los atributos de los objetos para hacerlos coincidir con los posibles valores de los atributos de los archivos externos, asegurando que un mismo nombre sea usado para un mismo objeto o atributo. Estos diccionarios y las listas de códigos externas pueden ser ampliados o redefinidos por el usuario.

4.3.4.7 Referencias externas. Los objetos 3D comúnmente se derivan o tienen alguna relación con otras bases de datos o conjuntos de datos, por ejemplo, el modelo de una edificación puede ser construido a partir de los planos catastrales en 2D o puede ser obtenido a partir de un modelo arquitectónico. De igual manera a un objeto 3D se le puede integrar información externa como los datos personales del dueño o la información sobre las antenas y puertas para un sistema de información de alguna empresa constructora, ver Figura 16.

Figura 16. Referencias externas de CityGML



Fuente: OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard - Gerard Gröger

4.3.4.8 Grupos de objetos de ciudad. El concepto de agrupación permite la incorporación de objetos arbitrarios de acuerdo al criterio definido por el usuario, así como para representar y transferir estas incorporaciones como parte de un modelo de ciudad. Un grupo se le pueden asignar uno o más nombres y además también puede ser clasificado por atributos específicos.

4.3.4.9 Apariencias. La información acerca de la apariencia de las superficies o propiedades de la superficie se consideran como una parte integral de los modelos virtuales de ciudades 3D, además de la geometría y la semántica. CityGML soporta las características de apariencias para un número arbitrario de temas por modelo de ciudad. Cada nivel de detalle (LOD) de una característica puede tener una apariencia individual.

4.3.4.10 Concepto de prototipos de objetos. En CityGML los objetos de igual forma como los árboles, señales de tránsito y semáforos pueden ser representados como prototipos que se pueden instanciar varias veces en diferentes lugares, ver Figura 17. La geometría de los prototipos se define en sistemas de coordenadas locales. Cada instancia se representa por una referencia del prototipo y la matriz de transformación facilita el escalamiento, la rotación y la traslación del prototipo.

Figura 17. Ejemplos de prototipos de formas en CityGML



Fuente: OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard - Gerard Gröger

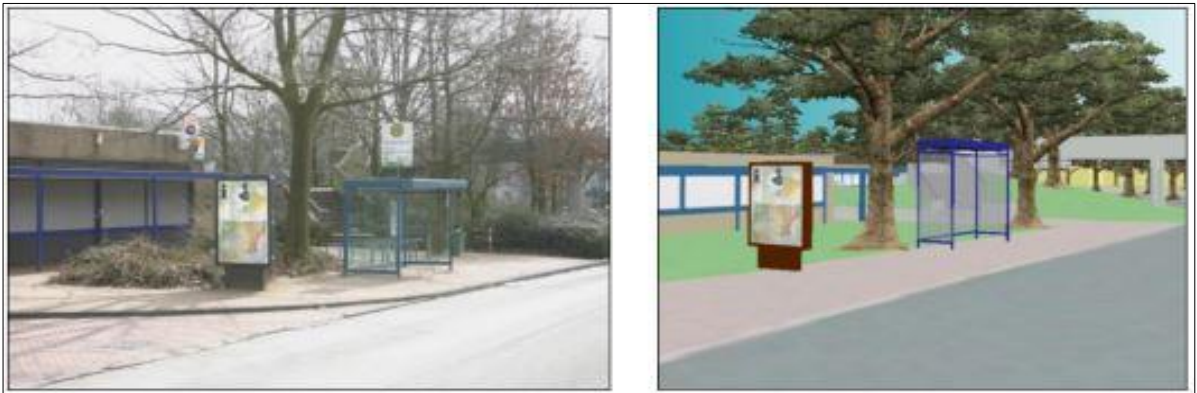
4.3.4.11 Objetos de ciudad y atributos genéricos. CityGML está siendo diseñado como un modelo universal de información topográfica que define los tipos de objetos y atributos que son útiles para un amplio rango de aplicaciones. Por esta razón, CityGML proporciona dos diferentes conceptos para soportar el intercambio de datos: objetos y atributos genéricos y aplicaciones de extensión del dominio - ADE (del inglés Application Domain Extensions).

4.3.5. Módulos de CityGML. Dentro de los módulos anteriormente mencionados se hace un énfasis especial en el módulo de mobiliario urbano “cityFurniture”, debido a que éste hace parte de la temática para el desarrollo de este proyecto de investigación.

4.3.5.1 Módulo CityFurniture. Los objetos que conforman el mobiliario urbano son objetos inmóviles como: lámparas, señales de tránsito, semáforos, postes, paradero de buses, bancas, entre otros, ver Figura 18. El modelado de los objetos de cityFurniture es usado para la visualización de la ubicación de los elementos

del mobiliario urbano, la simulación de tráfico de una ciudad, la navegación virtual, entre otros.

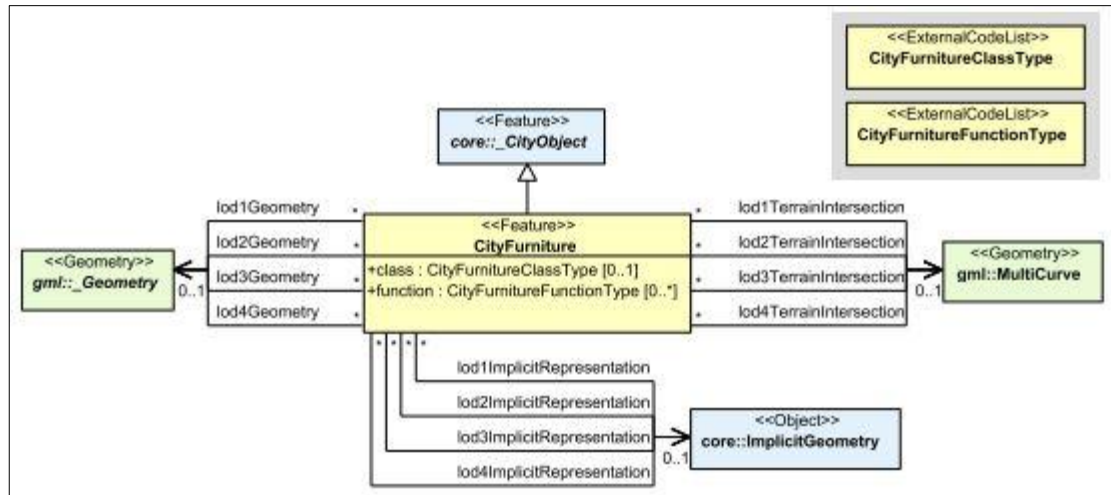
Figura 18. Imagen digital de un paradero de bus (izquierda) y modelo tridimensional del mismo paradero de bus (derecha)



Fuente: OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard - Gerard Gröger

El diagrama de UML del modelo cityFurniture que se visualiza en la Figura 19, muestra que esta clase está compuesta por dos atributos: *class* y *function*, sus posibles valores son especificados en las listas de código externas. El atributo *class* permite la clasificación de los objetos: señales de tránsito, semáforos, bolardos, canecas de basuras, entre otros, mientras que el atributo *function* describe a cuál temática pertenece el objeto: transporte, control de tráfico, arquitectura y demás.

Figura 19. Diagrama UML de los objetos del módulo CityFurniture



Fuente: OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard - Gerard Gröger

4.3.5.2 Lista externa de códigos del módulo CityFurniture. En la Figura 20 representa los valores correspondientes a las listas de códigos externas de CityGML para el módulo de cityFurniture. Estos valores son propuestos por el SIG 3D y pueden ser extendidos o reemplazados por otras comunidades para ajustarlos a sus necesidades.

Figura 20. Lista de códigos externos del módulo CityFurniture

C.2 City furniture			
CityFurnitureClassType			
Code list derived from German authoritative standards ALKIS/ATKIS (www.adv-online.de)			
1000	traffic	1020	others
1010	communication		
CityFurnitureFunctionType			
Code list derived from German authoritative standards ALKIS/ATKIS (www.adv-online.de)			
1000	communication fixture	1270	pole
1010	telephone box	1280	radio mast
1020	postbox	1290	aerial
1030	emergency call fixture	1300	radio telescope
1040	fire detector	1310	chimney
1050	police call post	1320	marker
1060	switching unit	1330	hydrant
1070	road sign	1340	upper corridor fire-hydrant
1080	traffic light	1350	lower floor panel fire-hydrant
1090	free-standing sign	1360	slidegate valve cap
1100	free-standing warning sign	1370	entrance shaft
1110	bus stop	1380	converter
1120	milestone	1390	stair
1130	rail level crossing	1400	outside staircase
1140	gate	1410	escalator
1150	streetlamp, lantern or candelabra	1420	ramp
1160	column	1430	patio
1170	lamp post	1440	fence
1180	flagpole	1450	memorial/monument
1190	street sink box	1470	wayside shrine
1200	rubbish bin	1480	crossroads
1210	clock	1490	cross on the summit of a mountain
1220	directional spot light	1500	fountain
1230	floodlight mast	1510	block mark
1240	windmill	1520	boundary post
1250	solar cell	1530	bench
1260	water wheel	1540	others

Fuente: OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard - Gerard Gröger

4.4. SEÑALES DE TRÁNSITO

A nivel nacional el Ministerio de Transporte ha llevado a cabo políticas para la seguridad vial, unificación y estandarización de las normas para los diferentes

elementos que contribuyen a la regulación del tránsito en Colombia. Por esta razón, a mediados del 2004 el Ministerio publica el Manual de Señalización Vial, con el fin de que todas las entidades responsables de la infraestructura vial como constructores, consultores, interventores, proveedores de materiales, profesionales en ingeniería y autoridades de tránsito, tengan una guía con las especificaciones para el diseño, ubicación y aplicación de los dispositivos para la regulación del tránsito en las vías nacionales, departamentales y municipales.

4.4.1 Conceptos básicos sobre las señales de tránsito

4.4.1.1 Función. Los dispositivos de tránsito tienen como función principal mostrar a los usuarios las precauciones que debe tener en cuenta, las limitaciones que rigen el tránsito de determinada vía y las informaciones estrictamente necesarias, dadas las condiciones de la misma [87].

4.4.1.2 Visibilidad. Los dispositivos para la regulación del tránsito deben ser contruidos con materiales reflectantes con el fin de garantizar su visibilidad y la misma forma y color tanto en el día como en la noche. Esta reflectancia se logra fabricando estos dispositivos con materiales que reflejen las luces de los vehículos, teniendo cuidado de no deslumbrar al conductor [87].

4.4.1.3 Uso. Antes de llevar a cabo la instalación de un dispositivo, se debe elaborar siempre un estudio técnico que permita establecer el mejor uso y ubicación de las señales evitando inconvenientes por su mala utilización. El uso de símbolos, pictogramas, leyendas, letras, palabras y estilo, deben ajustarse a los parámetros establecidos en el documento del Manual de Señalización Vial [87].

4.4.2 Clasificación de las Señales de tránsito. Las señales de tránsito se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- *Señales de tránsito horizontales*, que corresponden a la aplicación de marcas viales, conformadas por líneas, flechas, símbolos y letras que se pintan sobre el pavimento, bordillos o sardineles y estructuras de vías de circulación adyacentes a ellas.
- *Señales de tránsito verticales*, son placas fijadas en postes o estructuras instaladas sobre la vía o adyacentes a ella, que mediante símbolos o leyendas cumplen la función de comunicar a los usuarios las limitaciones y condiciones que posee la vía.

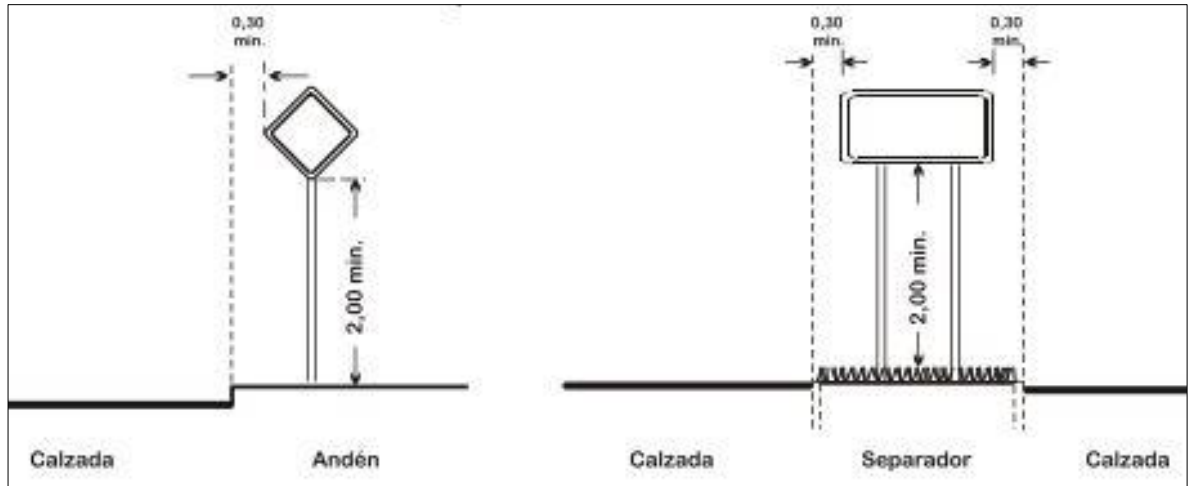
4.4.2.1 Señales Verticales. El objetivo principal de estas señales de tránsito es advertir a los usuarios sobre la existencia de riesgos que se presentan al transitar por determinada vía, de igual manera, sirven para reglamentar las prohibiciones o restricciones respecto del uso de la vía, así como ofrecer información necesaria para guiar a los usuarios que circulan por la misma.

4.4.2.1.1 Ubicación. Todas las señales verticales se encuentran instaladas al lado derecho de la vía, teniendo en cuenta el sentido de circulación del tránsito ver Figura 21, de forma que el plano frontal de la señal y el eje de la vía formen un ángulo entre 85° y 90° . Algunas excepciones como en las vías de varios carriles las señales se colocan en ambos lados de la vía, así mismo, cuando no hay buena visibilidad en el lado derecho de la vía, entonces se instala otra señal en el lado izquierdo para complementar la visibilidad.

En las zonas urbanas estas señales se encuentran instaladas de tal forma que la distancia de la señal medida desde su extremo más sobresaliente hasta el borde del andén no sea menor de 0.3 metros. La altura de la señal medida desde el extremo inferior del tablero hasta la cota del borde del andén no debe ser menor de 2.0 metros [87].

Los tableros de las señales son elaborados en lámina de acero galvanizado, aluminio o poliéster reforzado con fibra de vidrio, los mensajes de la señales son elaborados sobre láminas reflectantes y adheridos a la lámina metálica.

Figura 21. Ubicación de las señales de tránsito verticales en el entorno urbano



Fuente: Manual de Señalización Vial – Ministerio de Transporte

4.4.2.1.2 Dimensiones. De acuerdo con el manual de señalización vial las dimensiones de las señales para las vías urbanas se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Dimensiones de los tableros de las señales verticales en vías urbanas

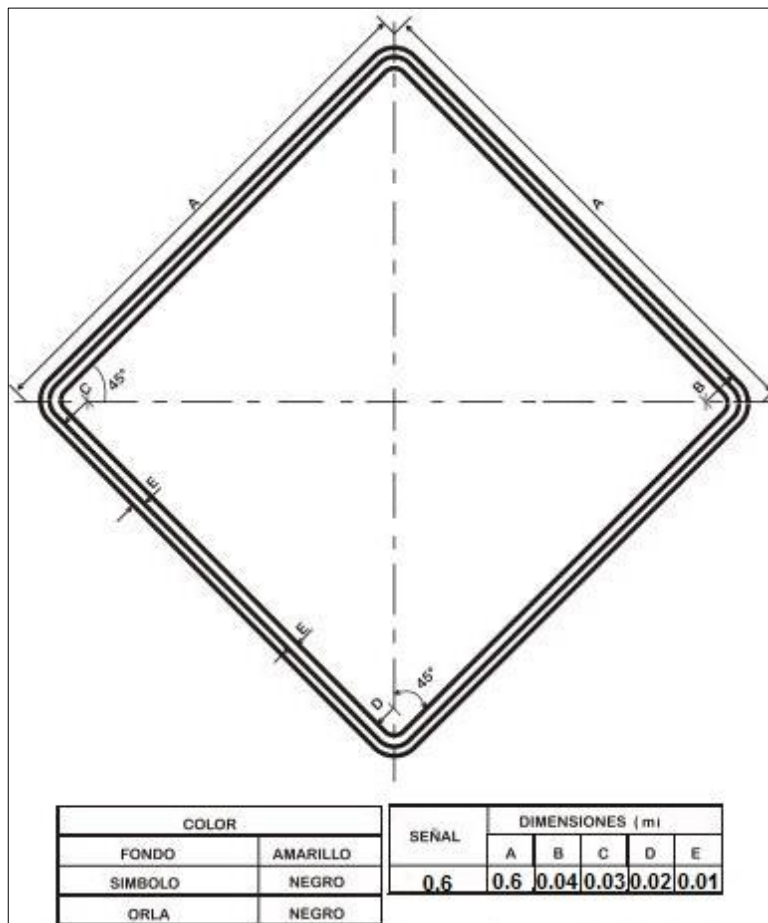
Tipo de Señal	Vías Urbanas principales
Preventivas	Cuadrado de 0.6 x 0.60 m
Reglamentarias	Círculo de 0.6 m de diámetro
	Octágono con altura de 0.6 m
	Triángulo equilátero de 0.75 m de lado
Informativas	Rectángulo de 0.5 x 0.6 m

- Señales Reglamentarias.
- Señales Informativas.

4.4.3 Señales Preventivas. Estas señales también son llamadas de prevención y tienen como objeto advertir al usuario de la vía la existencia de una condición peligrosa y la naturaleza de ésta.

Este tipo de señales tienen forma de cuadrado con diagonal vertical rombo ver Figura 23. Los colores utilizados generalmente en estas señales son: el amarillo para el fondo y el negro para orlas, símbolos, letras y números.































































Figura 23. Dimensión de la Señal Preventiva



Fuente: Manual de Señalización Vial - Ministerio de Transporte

Las señales preventivas son ubicadas antes de algún riesgo existente en la vía. En las vías urbanas se ubican a una distancia que varía de 60 a 80 metros. En la Figura 24 se representa la clasificación y el criterio para el uso de cada una de las señales preventivas.

Figura 24. Señales Preventivas

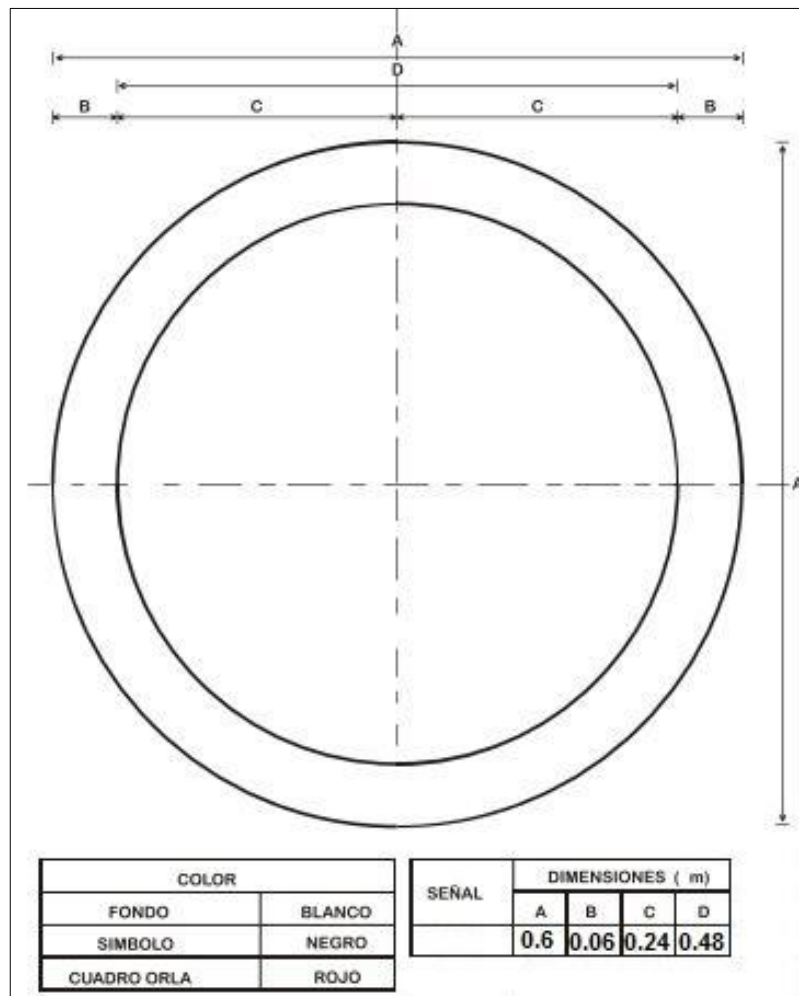
SP-01  CURVA PELIGROSA A LA IZQUIERDA	SP-02  CURVA PELIGROSA A LA DERECHA	SP-03  CURVA PRONUNCIADA A LA IZQUIERDA	SP-04  CURVA PRONUNCIADA A LA DERECHA	SP-05  CURVA Y CONTRACURVA PELIGROSA IZO-DER	SP-06  CURVA Y CONTRACURVA PELIGROSA DER-IZO	SP-07  CURVA SUCESIVAS PRIMERA-IZQUIERDA	SP-08  CURVA SUCESIVAS PRIMERA-DERECHA
SP-09  CURVA Y CONTRACURVA PRONUNCIADA IZO-DER	SP-10  CURVA Y CONTRACURVA PRONUNCIADA DER-IZO	SP-11  INTERSECCIÓN DE VÍAS	SP-12  VÍA LATERAL IZQUIERDA	SP-13  VÍA LATERAL DERECHA	SP-14  BIFURCACIÓN EN "T"	SP-15  BIFURCACIÓN EN "Y"	SP-16  BIFURCACIÓN IZQUIERDA
SP-17  BIFURCACIÓN DERECHA	SP-18  BIFURCACIÓN ESCALONADA IZO-DER	SP-19  BIFURCACIÓN ESCALONADA DER-IZO	SP-20  GLORIETA	SP-21  INCORPORACIÓN DE TRÁNSITO IZQUIERDA	SP-22  INCORPORACIÓN DE TRÁNSITO DERECHA	SP-23  SEMAFORO	SP-24  SUPERFICIE LIZADA
SP-25  RESALTO	SP-26  DEPRESIÓN	SP-27  DESCENSO PELIGROSO	SP-28  REDUCCIÓN SIMÉTRICA DE LA CALZADA	SP-29  PREVENCIÓN DE PASO	SP-30  REDUCCIÓN ASIMÉTRICA DE LA CALZADA IZO	SP-31  REDUCCIÓN ASIMÉTRICA DE LA CALZADA DER	SP-32  ENSANCHE SIMÉTRICO DE LA CALZADA
SP-33  PREVENCIÓN DE CEDA EL PASO	SP-34  ENSANCHE ASIMÉTRICO DE LA CALZADA IZO	SP-35  ENSANCHE ASIMÉTRICO DE LA CALZADA DER	SP-36  PUENTE ANGOSTO	SP-37  TUNEL	SP-38  20 Ton PESO MÁXIMO TOTAL PERMITIDO	SP-39  CIRCULACIÓN EN DOS SENTIDOS	SP-41  TRES CARRILES JUNTO EN CONTRAPLANAJE
SP-42  ZONA DE DERRUMBE	SP-43  TRES CARRILES DOS EN CONTRAPLANAJE	SP-44  SUPERFICIE DESLIZANTE	SP-45  MAQUINARIA AGRÍCOLA EN LA VÍA	SP-46  PEATONES EN LA VÍA	SP-47  ZONA ESCOLAR	SP-48  ZONA DEPORTIVA	SP-49  ANIMALES EN LA VÍA
SP-50  4.50 ALTURA LIBRE	SP-51  3.20 ANCHO LIBRE	SP-52  CRUCE A NIVEL CON EL FERROCARRIL	SP-53  BARRERA	SP-55  INICIO DE SEPARADOR (DOS SENTIDOS)	SP-55A  INICIO DE SEPARADOR (UN SENTIDO)	SP-56  TERMINACIÓN DE VÍA CON SEPARADOR (DOS SENTIDOS)	SP-56A  TERMINACIÓN DE VÍA CON SEPARADOR (UN SENTIDO)
SP-57  FINAL DEL PAVIMENTO	SP-59  CICLISTAS EN LA VÍA	SP-67  RIESGO DE ACCIDENTE	SPO-01  TRABAJOS EN LA VÍA	SPO-02  MAQUINARIA EN LA VÍA	SPO-03  BANDERERO		

Fuente: Manual de Señalización Vial - Ministerio de Transporte

4.4.4 Señales Reglamentarias. Estas señales comúnmente llamadas de reglamentación tienen como objetivo indicar a los usuarios de las vías las limitaciones, prohibiciones o restricciones sobre su uso. Su desacato acarrea las sanciones previstas por el Código Nacional de Tránsito Terrestre.

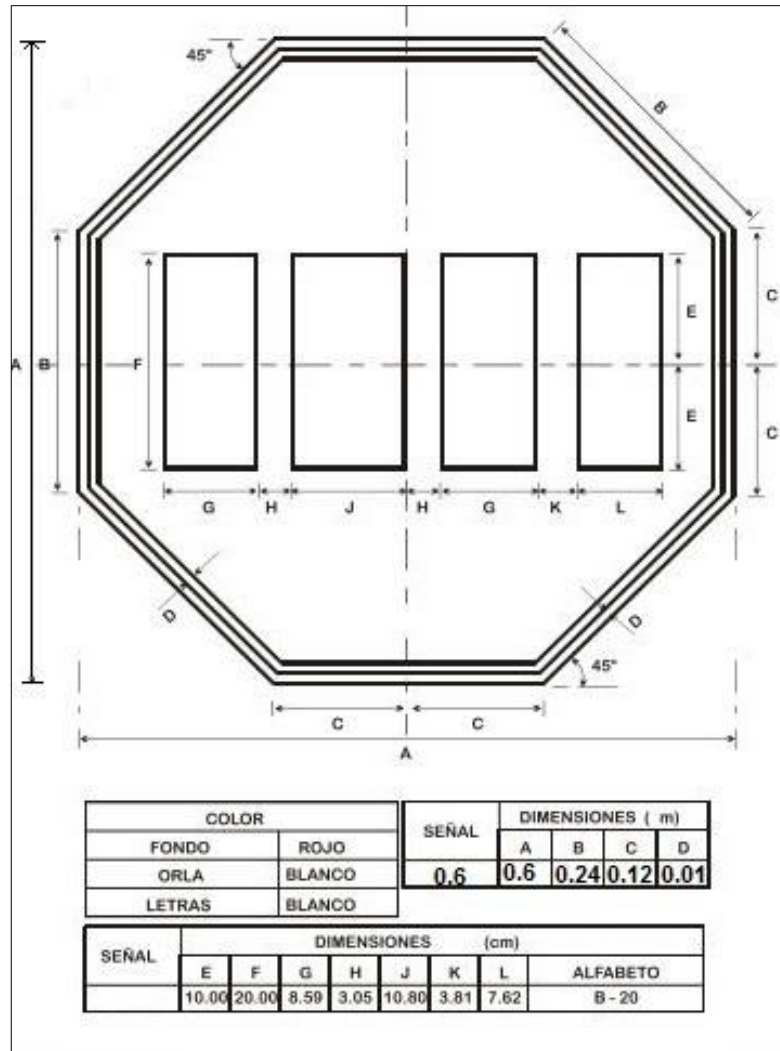
Este tipo de señales en general tiene forma circular, ver Figura 25, excepto la señal de Pare que tiene forma de octágono regular ver Figura 26 y de la señal de Ceda el Paso que tiene forma de triángulo equilátero invertido, ver Figura 27.

Figura 25. Dimensiones de la Señal Reglamentaria Circular



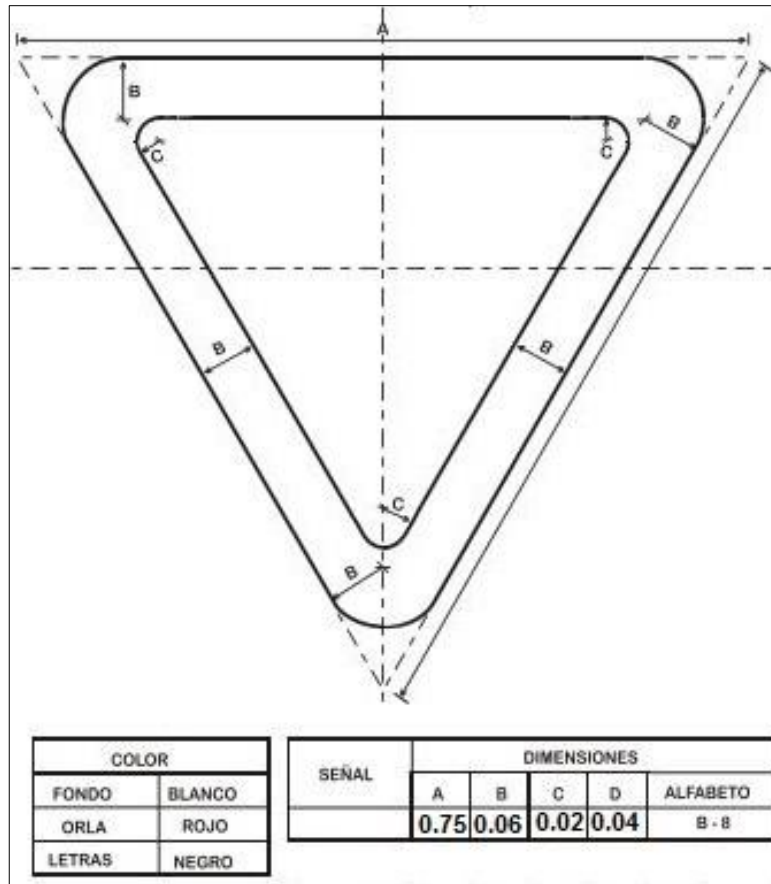
Fuente: Manual de Señalización Vial - Ministerio de Transporte

Figura 26. Dimensiones de la Señal Reglamentaria - Pare



Fuente: Manual de Señalización Vial - Ministerio de Transporte

Figura 27. Dimensiones de la Señal Reglamentaria - Ceda el Paso





















Fuente: Manual de Señalización Vial - Ministerio de Transporte

Los colores utilizados en estas señales generalmente son el blanco para el fondo, el rojo para las orlas y franjas diagonales y el color negro para los símbolos, letras y números. Las excepciones son: la señal de Pare cuyo color de fondo es el rojo y las orlas y letras son en blanco; la señal de Ceda el Paso cuyo fondo es de color blanco y las orlas son rojas.

Las señales reglamentarias se encuentran ubicadas en el sitio mismo donde empieza aplicarse la reglamentación o prohibición que se describe en la señal. En la Figura 28 visualiza el listado junto con su imagen y su código respectivo de las diferentes señales de tránsito reglamentarias.

Figura 28. Señales Reglamentarias

SR-01  PARE	SR-02  CEDA EL PASO	SR-03  SIGA DE FRENTE	SR-04  NO PASE	SR-05  GIRO A LA IZQUIERDA SOLAMENTE	SR-06  PROHIBIDO GIRAR A LA IZQUIERDA	SR-07  GIRO A LA DERECHA SOLAMENTE	SR-08  PROHIBIDO GIRAR A LA DERECHA
SR-10  PROHIBIDO GIRAR EN "U"	SR-11  DOBLE VÍA	SR-12  TRES CARRILES (UNO EN CONTRAFLUJO)	SR-13  TRES CARRILES (DOS EN CONTRAFLUJO)	SR-14  PROHIBIDO EL CAMBIO DE CALZADA	SR-16  CIRCULACIÓN PROHIBIDA EN VEHÍCULOS AUTOMOTORES	SR-17  VEHÍCULOS PESADOS A LA DERECHA	SR-18  CIRCULACIÓN PROHIBIDA DE VEHÍCULOS DE CARGA
SR-19  PEATONES A LA IZQUIERDA	SR-20  CIRCULACIÓN PROHIBIDA DE PEATONES	SR-21  CIRCULACIÓN PROHIBIDA DE CABALGADURAS	SR-22  CIRCULACIÓN PROHIBIDA DE BICICLETAS	SR-23  CIRCULACIÓN PROHIBIDA DE MOTOCICLETAS	SR-24  CIRCULACIÓN PROHIBIDA DE MAQUINARIA AGRÍCOLA	SR-25  CIRCULACIÓN PROHIBIDA DE VEHÍCULO DE TRACCIÓN ANIMAL	SR-26  PROHIBIDO ADELANTAR
SR-28  PROHIBIDO PARQUEAR	SR-28A  NO PARQUEAR NI DETENERSE	SR-29  PROHIBIDO PISAR	SR-30  VELOCIDAD MÁXIMA	SR-31  PESO MÁXIMO TOTAL PERMITIDO	SR-32  ALTURA MÁXIMA PERMITIDA	SR-33  ANCHO MÁXIMO PERMITIDO	SR-34  ZONA DE ESTACIONAMIENTO DE TAXIS
SR-35  CIRCULACIÓN DE LUCES BAJAS	SR-36  RETEN	SR-37  CICLOVÍA	SR-40  PARADERO	SR-41  PROHIBIDO DEJAR O RECOGER PASAJEROS	SR-42  ZONA DE CARGUE Y DESCARGUE	SR-43  PROHIBIDO EL CARGUE Y DESCARGUE	SR-44  ESPACIAMIENTO
SR-45  INDICACIÓN DE SEPARADOR TRANSITO A LA IZQUIERDA	SR-46  INDICACIÓN DE SEPARADOR TRANSITO A LA DERECHA	SRO-01  VÍA CERRADA	SRO-02  DESVÍO	SRO-03  PASO UNO A UNO			

Fuente: Manual de Señalización Vial - Ministerio de Transporte

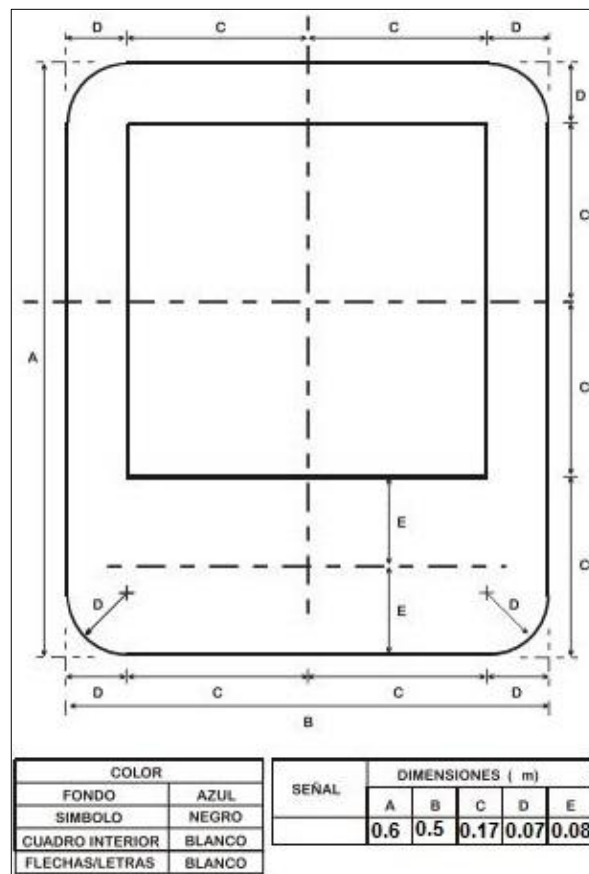
4.4.5 Señales Informativas. Las señales informativas, cumplen la función de guiar al usuario de la vía proporcionándole la información necesaria sobre la ubicación de los lugares, destinos, direcciones, sitios de interés turístico, geográficos, intersecciones, cruces, distancias por recorrer, prestación de servicio, entre otros. Este tipo de señal se clasifican en:

- *De identificación*, usadas para identificar las carreteras.
- *De destino*, indican al usuario de la vía el nombre, la dirección y la distancia de ubicación de las poblaciones que se encuentran en la ruta.
- *De información general*, indican lugares de interés general para los usuarios de las vías.

- *De servicios*, muestran los lugares en donde se prestan servicios personales o a los vehículos.
- *De información turística*, publican información referente a atractivos naturales o culturales.

Este tipo de señales tienen forma de rectángulo, ver Figura 29. Los colores utilizados generalmente en estas señales son: el azul para el fondo, el recuadro es de color blanco, el pictograma es negro y las letras, números y flechas son blancos. Existen algunas excepciones como las señales informativas de identificación y de destino que son de fondo blanco y las letras, orlas, flechas y números en negro.

Figura 29. Dimensiones de la Señal Informativa



Fuente: Manual de Señalización Vial - Ministerio de Transporte

La ubicación de este tipo de señales depende de su clasificación, las de identificación están situadas adyacentes a las señales de destino que identifiquen la ruta a la cual hace referencia. Las informativas de destino están ubicadas antes de una intersección o de un cruce dependiendo de la velocidad promedio de la vía. Las demás señales informativas se encuentran ubicadas en el mismo sitio que pretende señalar. . En la Figura 30 se representa la clasificación de cada una de las señales preventivas existentes.

Figura 30. Señales Informativas

SI-05C  DESCRIPCIÓN DE GIROS	SI-07  SITIO DE PARQUEO	SI-07A  ZONA ESPECIALES DE PARQUEO	SI-08  PARADERO DE BUSES	SI-09  ESTACIONAMIENTO DE TAXIS	SI-10  TRANSBORDADOR	SI-11  VIA PARA CICLISTAS	SI-12  MONUMENTO NACIONAL
SI-13  500 m ZONA MILITAR	SI-14  AEROPUERTO	SI-15  HOSPEDAJE	SI-16  PRIMEROS AUXILIOS	SI-17  SERVICIOS SANITARIOS	SI-18  500 m RESTAURANTE	SI-19  1 Km TELÉFONO	SI-20  IGLESIA
SI-21  TALLER	SI-22  1 Km ESTACIÓN DE SERVICIO	SI-23  MONTAÑANTAS	SI-24  CRUCE PEATONAL	SI-25  DISCAPACITADOS	SI-29  TRANSPORTE FERROVIARIO	SI-30  TRANSPORTE MASIVO	SI-31  ZONA RECREATIVA
SI-32  CAMBIO DE MONEDA	SI-33  ZONA DE CAMPING	SI-34  PLAYA	SI-35  MUSEO	SI-36  MUELLE	SI-37  ZOOLOGICO	SI-38  PUNTO DE INFORMACIÓN TURISTICA	SI-39  ARTESANÍAS
SI-40  BIENES ARQUEOLÓGICOS	SI-41  LAGO	SI-42  POLIDEPORTIVO	SI-43  MIRADOR	SI-44  ALQUILER DE AUTOS	SI-45  ATRACTIVO NATURAL	SI-46  VOLCÁN	SI-47  NEVADO
SI-48  TERMAL	SI-49  CASCADA	SI-50  PESCA	SIO-01  OBRA EN LA VIA A 100 m APROXIMACIÓN OBRA EN LA VIA	SIO-02  INICIO DE OBRA INFORMACIÓN INICIO DE OBRA	SIO-03  FIN DE OBRA INFORMACIÓN FIN DE OBRA	SIO-04  CARRIL CERRADO (DER-CENT-IZQ)	SIO-05  DESVÍO A 100 m DESVÍO

Fuente: Manual de Señalización Vial - Ministerio de Transporte

5. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN

5.1. METODOLOGÍA DE DESARROLLO

Debido a las condiciones que se presentaba este trabajo de investigación, la metodología usada para el desarrollo de esta herramienta de software fue el de *Prototipos*, por ser un modelo donde el sistema es desarrollado por incrementos, de forma que se puedan ir ajustando los requerimientos más fácilmente en respuesta a la realimentación proporcionada por las necesidades del grupo de investigación Geomática.

Para un buen desempeño en el desarrollo de la metodología, es de gran importancia definir los requerimientos del sistema de forma global, en este caso, se busca el desarrollo de una herramienta de software que permita el reconocimiento automático de las señales de tránsito presentes en una nube de puntos recolectada mediante un escáner láser terrestre y a su vez convertirlas en un modelo tridimensional en el estándar CityGML, para luego ser visualizadas desde cualquier aplicación de software libre que reproduzca este tipo de formato. Esta herramienta es un primer paso hacia la construcción de modelos tridimensionales de ciudades virtuales que son de gran importancia para los proyectos que desarrolla el grupo de investigación Geomática.

Los pasos que se llevaron a cabo para el desarrollo de este trabajo de investigación se presentan en la Figura 31, donde se comienza con la adquisición de los datos por medio del escáner láser terrestre RIEGL VZ-400, que como ya se mencionó anteriormente, esta información recolectada está representada por nubes de puntos que contienen las coordenadas XYZ de toda la escena. Para el

caso de este proyecto se realizó un total de diez escaneos sobre la carrera 27 entre las calles 14 y 18.

La siguiente etapa consistió en el registro de estas diez nubes de puntos mediante el software RiSCAN PRO que es de la misma empresa fabricante del RIEGL VZ-400 y que también fue adquirido por el grupo.

Después, se llevó a cabo el pre-procesamiento de la nube de puntos, que consistió en dividir esta nube en secciones más pequeñas para que puedan ser procesadas por los algoritmos de una manera más rápida.

Luego, se removieron los puntos que pertenecen al suelo con el fin de analizar solamente aquellos puntos que corresponden a los objetos que se encuentran por encima del suelo. Con estos puntos se realizó la segmentación basada en grafos para identificar los clústeres (o grupos de puntos) contenidos dentro de cada sección. Después, sobre cada uno de los clústeres se realizó otro tipo de segmentación para identificar cuáles de ellos tenían forma lineal o alargada (que es la característica propia de las señales de tránsito). A los clústeres que fueron identificados como lineales, se le aplicó un filtro basado en la densidad para remover el ruido presente alrededor de ellos.

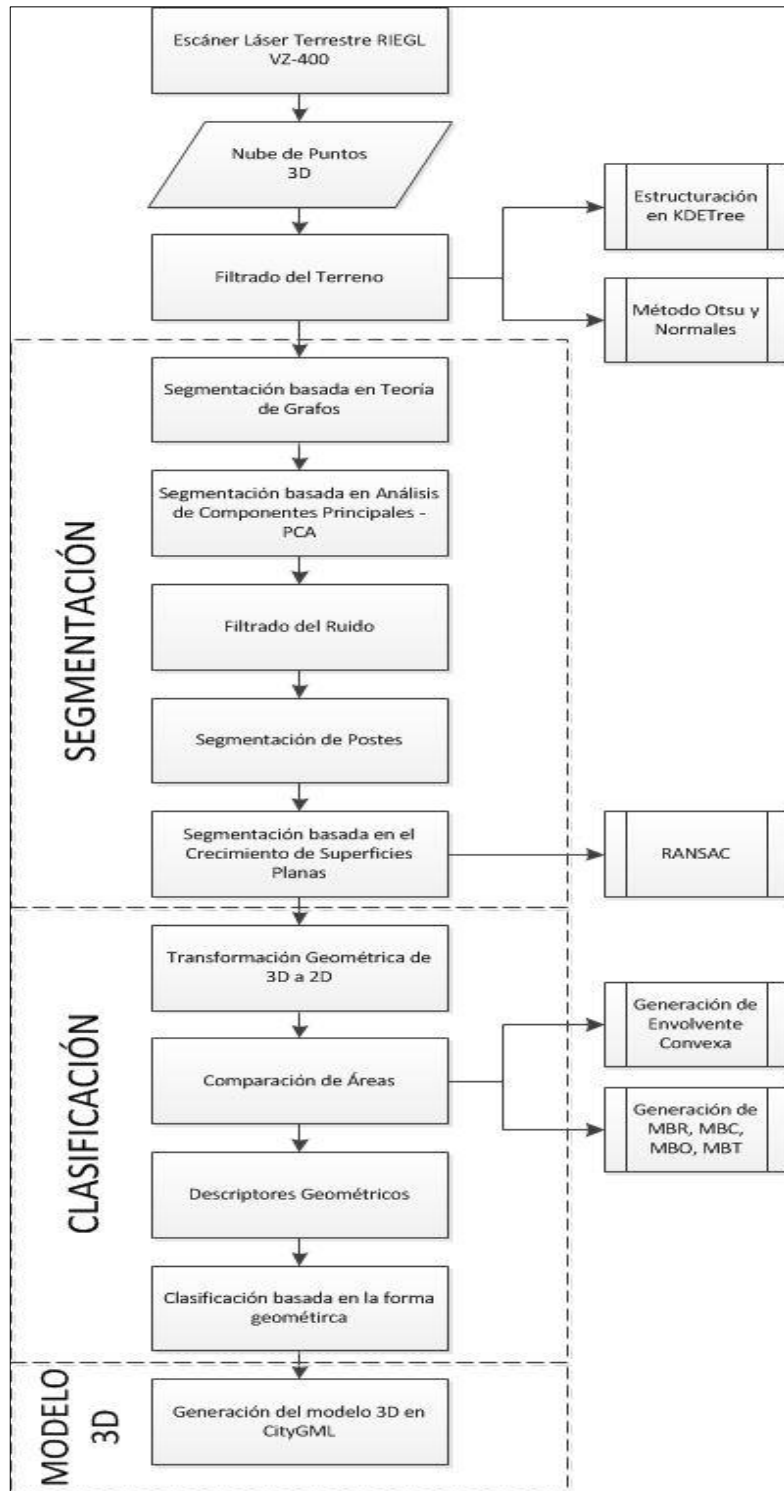
El paso siguiente consistió en identificar cuáles de estos clústeres lineales estaban conformados por postes (*pole en inglés*), debido a que la mayoría de las señales de tránsito se encuentran ancladas en algún poste ya sea circular o angular. A estos clústeres identificados se les remueve el poste dejando solamente la región que no tiene forma de poste. A esta región se le aplica una segmentación para identificar cuáles de ellos presentan una superficie plana.

Finalmente, a los clústeres que fueron identificados con superficies planas, se les aplicó una clasificación basada en la forma, con el fin de identificar la clase de

señal de tránsito y su porcentaje de exactitud con respecto a las dimensiones reglamentadas por el Manual de Señalización Vial [87]. De igual manera, en la Figura 32 se presenta una versión más didáctica acerca de la metodología usada en el desarrollo de este proyecto.

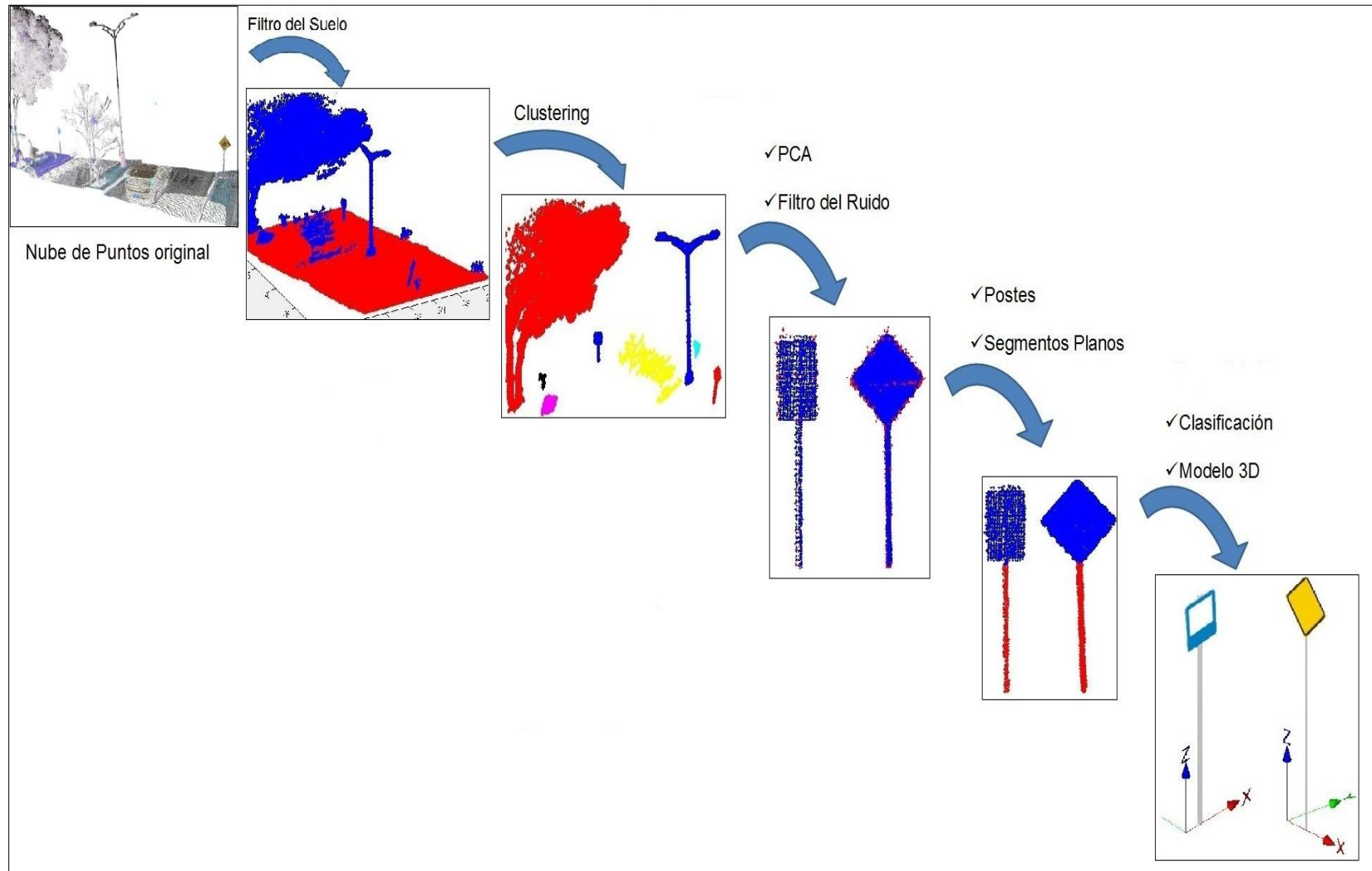
Todos los algoritmos utilizados en el procesamiento de los datos del escáner fueron desarrollados en código Matlab R2012b y C++ y se ejecutaron en un computador HP Workstation con procesador Intel Xeon Quad Core 3.20GHz, memoria RAM de 16GB y sistema operativo de 64 bits, proporcionado por el grupo de investigación Geomática exclusivamente para el desarrollo de este proyecto, debido al gran volumen de información que se procesa.

Figura 31. Diagrama de flujo de la Metodología usada en este trabajo de investigación



Fuente: Elaboración propia

Figura 32. Metodología didáctica usada en este trabajo de investigación



Fuente: Elaboración propia

5.2. ADQUISICIÓN DE LOS DATOS

El proceso de adquisición de los datos se realizó a través del levantamiento topográfico con el escáner láser terrestre RIEGL VZ-400, en el sector de la carrera 27 entre las calles 14 y 18. Dicho escáner fue adquirido por el grupo de investigación Geomática adscrito a la escuela de Ingeniería Civil, para sus proyectos de extensión que lleva a cabo con las demás entidades públicas y privadas. En la parte izquierda de la Figura 33 se muestra el panel de control donde el usuario configura el escáner y a la derecha se visualiza la parte por donde el escáner emite rayo láser.

Figura 33. Escáner Láser Terrestre RIEGL VZ-400



Fuente: Elaboración propia

5.2.1 Características técnicas del escáner RIEGL VZ-400. Este escáner proporciona una gran eficiencia al momento de hacer el levantamiento de la información topográfica en comparación con los métodos que se usan tradicionalmente. De igual manera, la información que se recolecta con este dispositivo tiene una gran precisión que está en el orden de los milímetros. Esta precisión se basa en la digitalización del último eco del láser y el análisis de la

forma de onda en el mismo instante en que regresa el pulso láser, ver Figura 34. De esta manera, este instrumento es capaz de alcanzar una gran exactitud en la medición debido al cálculo que realiza con los múltiples ecos que recibe, aún si existen condiciones adversas en el ambiente.

Figura 34. Señales de eco de los diferentes tipos de objetivos



Fuente: Elaboración propia

El mecanismo de escaneo está basado en una gran velocidad de rotación de un espejo poligonal compuesto de múltiples caras que emite el haz de láser en diferentes direcciones proporcionando líneas de escaneo unidireccionales y paralelas entre sí. En la Tabla 6 se presentan las características técnicas a nivel del hardware del escáner RIEGL VZ-400.

Tabla 6. Ficha técnica del Escáner RIEGL VZ-400

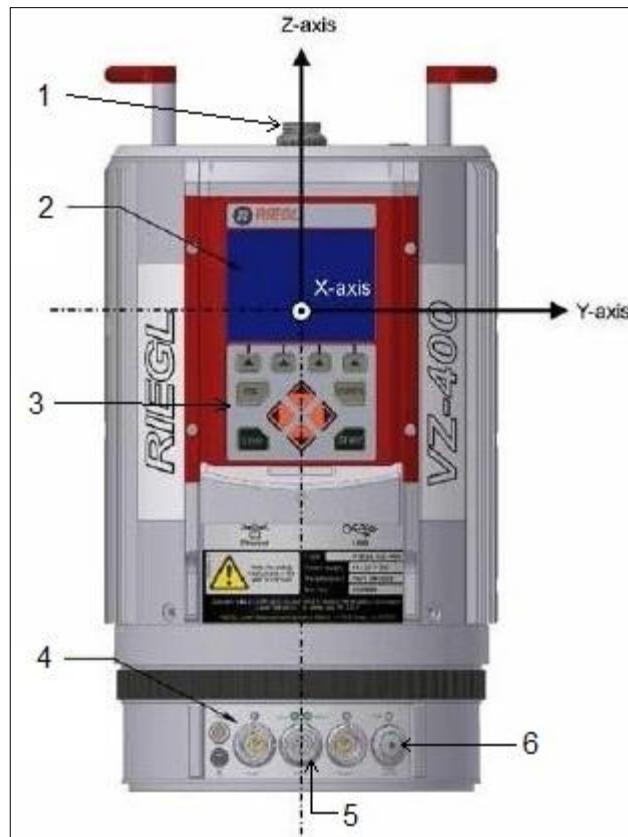
Característica	Valor
Clase de láser	Clase 1
Temperatura	0 a +40° en operación -10° a +50° en almacenamiento
Protección	Clase IP64

Característica	Valor	
Peso	9.6 kg.	
Mínimo alcance	1.5 m.	
Longitud de onda	Cerca al infrarrojo	
Divergencia del haz	0.3 mrad.	
Almacenamiento	SSD 80 GB	
Receptor GPS	Integrado con antena L1	
Desempeño en el alcance		
Característica	Modo de Largo Alcance	Modo de Alta Velocidad
Repetición del Pulso del Láser	100 KHz	300 KHz
Cantidad de puntos	42.000 ptos/seg	122.000 ptos/seg
Máximo alcance	600 m para $\rho > 90\%$ 280 m para $\rho > 20\%$	350 m para $\rho > 90\%$ 160 m para $\rho > 20\%$
Exactitud	5 mm	5 mm
Precisión	3 mm	3 mm
Desempeño en el Escaneo		
Característica	Escaneo Vertical	Escaneo Horizontal
Angulo de alcance	Total de 100 (+60° a -40°)	Máximo 360°
Mecanismo de Escaneo	Rotación del espejo	Rotación del cabezote
Velocidad del escaneo	3 líneas/seg a 120 líneas/seg	0/seg a 60°/seg
Ancho del paso angular	0.0024° a 0.288°	0.0024° a 0.5°

En la Figura 35 se muestra la parte correspondiente al panel de control del escáner láser RIEGL VZ-400 junto con la descripción de cada uno de los componentes de la siguiente manera:

1. Conector para la antena del GPS integrado en el escáner.
2. Pantalla de visualización.
3. Botones de configuración.
4. Conector de corriente.
5. Puerto TCP/IP
6. Botón de encendido y apagado.

Figura 35. Parte trasera del Escáner Láser Terrestre RIEGL VZ-400

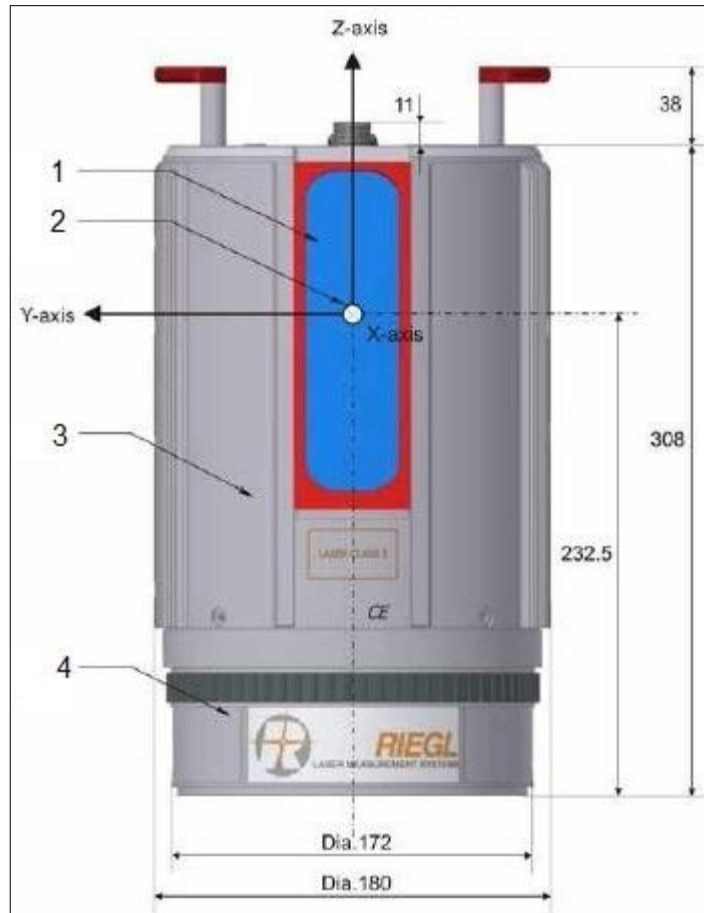


Fuente: 3D Terrestrial Laser Scanner RIEGL VZ-400/1000 General Description and Data Interfaces

En la Figura 36 se visualiza la parte por donde el escáner emite el rayo láser junto con sus dimensiones. La descripción de cada uno de los componentes en esta parte son:

1. Ventana por donde se emite el rayo láser.
2. Origen de las coordenadas de medición del láser.
3. Cabezote giratorio.
4. Parte fija del escáner.

Figura 36. Parte frontal del Escáner Láser Terrestre RIEGL VZ-400



Fuente: 3D Terrestrial Laser Scanner RIEGL VZ-400/1000 General Description and Data Interfaces

5.2.2 Planificación del levantamiento de la información. Para realizar un correcto levantamiento de la información con el escáner láser terrestre, primero se lleva a cabo una labor de preparación y planificación en oficina sobre el trabajo que se va a realizar en campo, para no tener ningún tipo de contratiempos en el momento de la recopilación de los datos. Los pasos que se siguen para hacer una buena planificación son:

- *Recopilación de información primaria:* que consiste en realizar una inspección visual del área en donde se va a levantar la información con el fin de hacer un buen reconocimiento de la zona, de igual manera, se hacen registros fotográficos desde diferentes posiciones, ver Figura 37, para evaluar las

condiciones reales del entorno e identificar posibles interferencias en el momento del levantamiento de la información.

Figura 37. Registro fotográfico de la carrera 27 entre calles 14 y 18



Fuente: Elaboración propia

- *Recopilación de información secundaria:* este tipo de información consiste en imágenes aéreas y satelitales que fueron tomadas del Sistema de Información Geográfica de Bucaramanga [88] y de la herramienta Google Earth [89], ver Figura 38. Estas imágenes permiten conocer la topografía del terreno desde una vista aérea y poder estimar en qué lugares posiblemente se debe ubicar el escáner.

Figura 38. Fotografía aérea de la carrera 27 entre calles 14 y 18



Fuente: Google Earth

- *Establecer las posiciones de escaneo:* con las fotografías del terreno y las imágenes aéreas se hace una planeación de los diferentes lugares desde donde se va a ubicar el escáner láser terrestre y calcular la distancia entre ellos con el fin de obtener el mejor alcance posible desde cada posición. Igualmente, se debe tener en cuenta las características propias del escáner como, la distancia mínima, para no ubicarse tan cerca de los elementos que se van a estudiar (en este caso, las señales de tránsito), la orientación y el ángulo de cobertura.
- *Elección de los equipos a utilizar:* es importante hacer un inventario de los elementos que se necesitan para realizar el levantamiento de la información en campo y así evitar contratiempos. Los principales equipos que se necesitan a parte del escáner láser terrestre son: el trípode, el nivelador, la batería, la cámara fotográfica, chalecos reflectores, identificación, entre otros.
- *Configuración del escáner láser terrestre:* una de las configuraciones más importantes es la de la resolución de escaneo, es decir, la cantidad de puntos en un área determinada. Por lo tanto, definir un patrón de escaneo con alta

resolución implica una mayor cantidad (densidad) de puntos, un aumento en el tiempo del escaneo y en el tamaño de los datos. Para el desarrollo de este proyecto no se requiere de tanta resolución, por lo tanto, se seleccionó el patrón de escaneo “*Panorama 60*”, cuyas propiedades se muestran en la Tabla 7. Esta configuración implica que en cada posición de escaneo, el láser se moverá 100° en vertical y rotará 360° en horizontal y con un paso angular de 0.06°. El tiempo promedio de escaneo con esta configuración es aproximadamente 1’23” y el tamaño de los datos recolectados está alrededor de 480Mb por cada posición de escaneo. También se debe tener en cuenta el sistema de referencia que se usa, para este proyecto se basó en el estándar internacional WGS84.

Tabla 7. Características del patrón de escaneo Panorama 60

	Ángulo de inicio	Ángulo de parada	Incremento	Cantidad
Escaneo Vertical	30°	130°	0.06°	1668
Escaneo Horizontal	0	360°	0.06°	6001

5.2.3 Levantamiento de la información. Establecidas las diferentes posiciones de escaneo en el mapa y teniendo en cuenta todas las consideraciones anteriormente mencionadas, se procedió a realizar el trabajo en campo. Para realizar el levantamiento de esta información, el escáner láser se montó sobre una camioneta con el fin de agilizar su traslado a las diferentes posiciones que habían sido marcadas previamente, ver Figura 39. Sin embargo, se hicieron algunas posiciones de escaneo en los separadores de la vía lo que implicó hacer el montaje del escáner con el trípode a nivel del suelo, estas posiciones se hicieron con el fin de obtener mayor información y así lograr un mejor registro de las nubes de puntos de cada una de las posiciones.

Figura 39. Levantamiento de la información con el Escáner Láser Terrestre montado sobre una camioneta



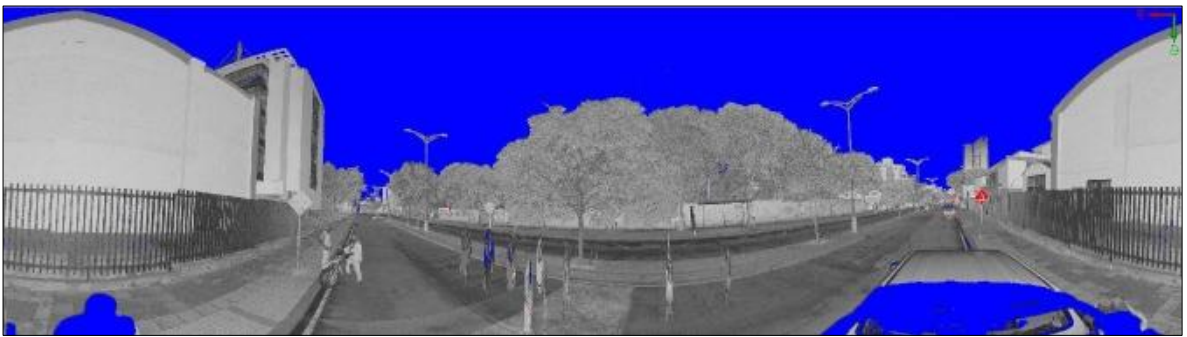
Fuente: Elaboración propia

Para iniciar el trabajo de levantamiento de la información, primero se crea un nuevo proyecto en el panel de control del escáner con las configuraciones establecidas en la etapa de planeación. Luego, se oprime la tecla “START” para dar inicio al escaneo de forma automática por parte del dispositivo.

La primera acción que realiza el escáner, es la búsqueda de satélites GPS con el receptor que tiene incorporado para establecer su posición geográfica, después de esta operación, realiza el proceso de escaneado mediante un barrido de 100° en vertical y 360° en horizontal, tomado puntos cada 0.06° que se van visualizando simultáneamente en su interfaz gráfica como se muestra en la Figura 40. Una vez

finalizada la etapa de escaneo, el dispositivo hace un registro fotográfico de la misma escena con la cámara digital que tiene instalada encima del escáner, en dicho registro se toman siete fotos traslapadas entre sí, para que después en la etapa de post-procesamiento se pueda asignar el valor RGB a cada punto de la nube recolectada en esa posición.

Figura 40. Imagen panorámica en 2D de la posición de escaneo No.007 visualizada a través de la interfaz gráfica del Escáner Láser Terrestre



Fuente: Elaboración propia

El resultado del trabajo de campo del sector de la carrera 27 entre calles 14 y 18 fue de diez posiciones de escaneo y las características de las nubes de puntos de cada posición se especifican en la

Tabla 8. En la Figura 41 se muestra un ejemplo de la visualización de la nube de puntos desde la posición de escaneo número cinco (Scan005), en donde la gráfica de la izquierda se muestra la nube de puntos en bruto, tal como se almacena en el escáner, mientras que en la gráfica de la derecha ya se le ha asignado el valor RGB a cada punto.

Tabla 8. Características de las nubes de puntos de cada posición de escaneo de la carrera 27 entre calles 14 y 18

Posición de escaneo	X	Y	Z	Cantidad de puntos	Tamaño MB
Scan001	-54.905	304.826	1013.954	6.795.530	442.7
Scan002	-65.709	-15.962	1016.459	7.925.703	466.4
Scan003	-31.260	232.648	1016.671	7.017.627	436.9
Scan004	-45.795	330.538	1013.374	7.083.238	385.8
Scan005	-44.339	276.232	1014.878	6.493.898	401.6
Scan006	-36.188	219.562	1016.605	6.175.070	439.2
Scan007	-32.841	196.407	1017.348	6.725.624	428.9
Scan008	-28.490	168.604	1018.231	7.031.039	474.1
Scan009	-7.980	38.494	1020.535	5.990.075	394.1
Scan010	-1.560	-1.224	1020.321	6.004.998	376.1

Figura 41. Visualización de la nube de puntos de la posición de escaneo Scan005

a) con respecto al valor de reflectancia b) con respecto al color RGB



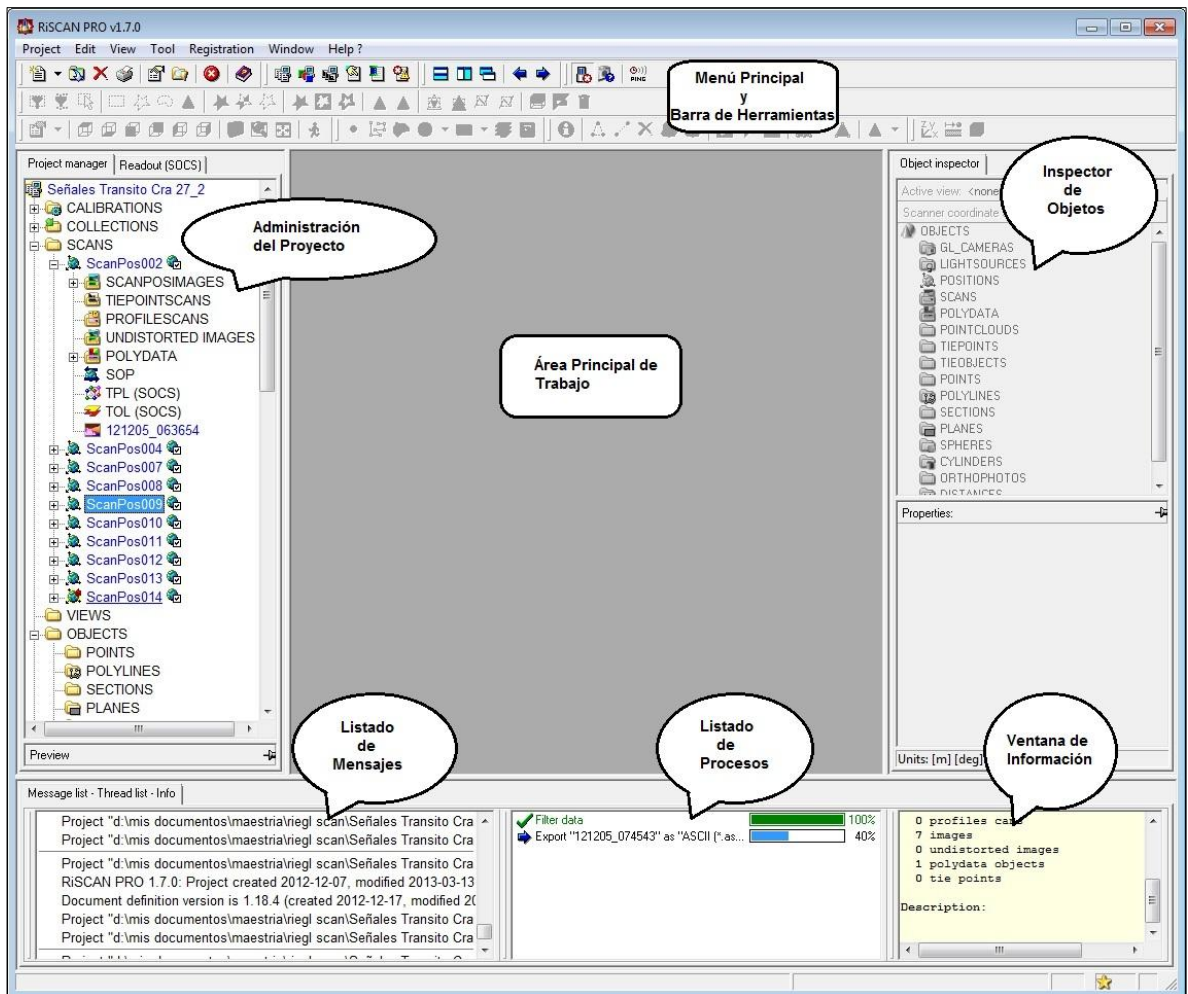
Fuente: Elaboración propia

5.3. REGISTRO DE LAS NUBES DE PUNTOS

Una vez realizado el trabajo en campo del levantamiento de la información topográfica, se siguió con la etapa de registro de la información. Como se mencionó en el capítulo anterior, el proceso de registro de las nubes de puntos consiste en la transformación de las coordenadas de cada una de ellas a un sistema de coordenadas común o a algún sistema de coordenadas de alguna posición de escaneo en particular.

El registro de las nubes de puntos se realizó mediante el software RiSCAN PRO 1.7 [90] de propiedad del mismo fabricante del escáner, ver Figura 42. Para llevar a cabo este proceso se requiere de un buen conocimiento de los conceptos de topografía y de las herramientas con las que cuenta este software, por lo tanto, se hizo necesario pasar por una etapa de entrenamiento previo, antes de realizar el proceso de registro de las nubes de puntos recolectadas para este proyecto.

Figura 42. Interfaz gráfica del software RiSCAN PRO 1.7



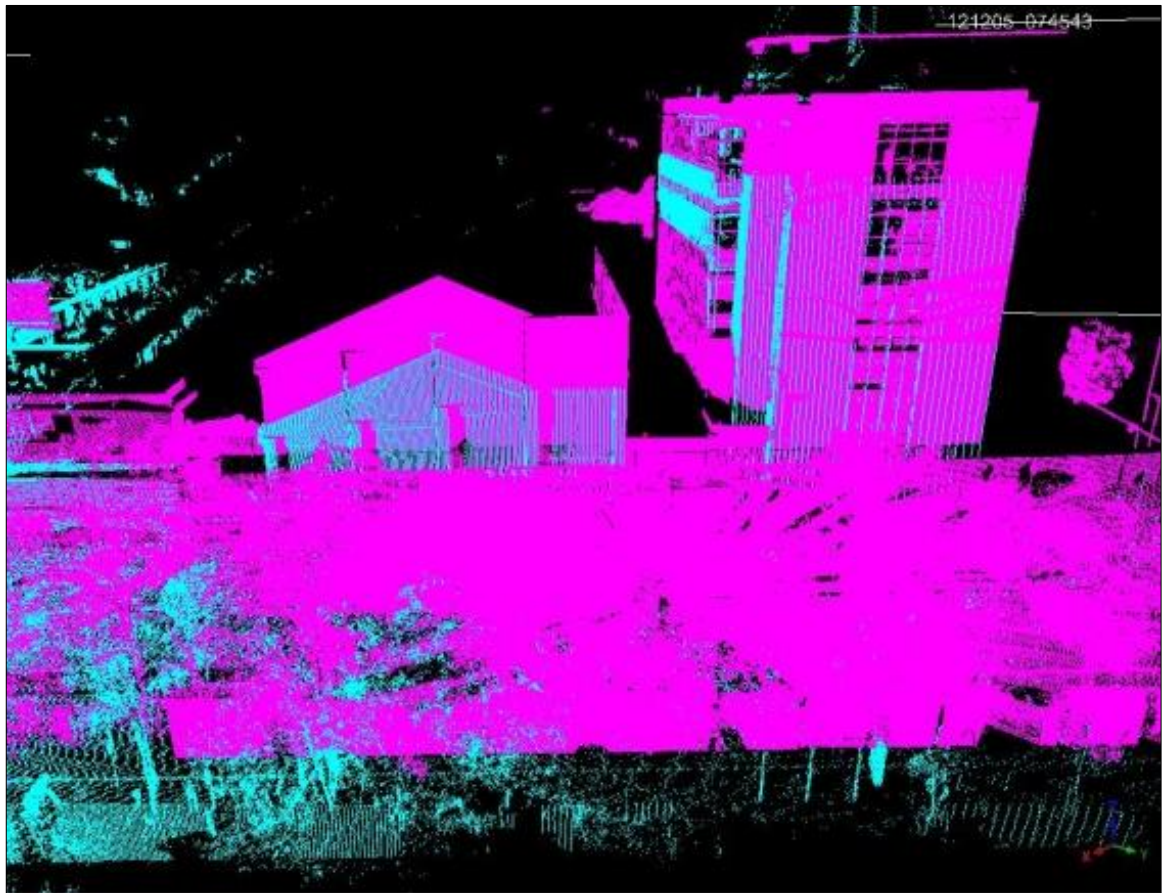
Fuente: Elaboración propia

El registro de las nubes de puntos con el software RiSCAN PRO se llevó a cabo mediante los siguientes pasos:

- Se cargaron las nubes de puntos de cada posición de escaneo en el área principal de trabajo del software, cada una con diferente color para poder analizar las diferencias que existen entre ellas en cuanto a su posición y orientación. En la Figura 43 se visualizan las nubes de puntos de las posiciones de escaneo Scan009 (color cian) y Scan010 (color fucsia), en donde se resalta a primera vista la diferencia en posición y orientación entre

ellas, esto se debe a que en alguna de las dos se presentó un mayor error en la lectura del GPS o que hubo diferencias en la nivelación del escáner.

Figura 43. Nube de puntos de las posiciones de escaneo Scan009 y Scan010 sin Registrar

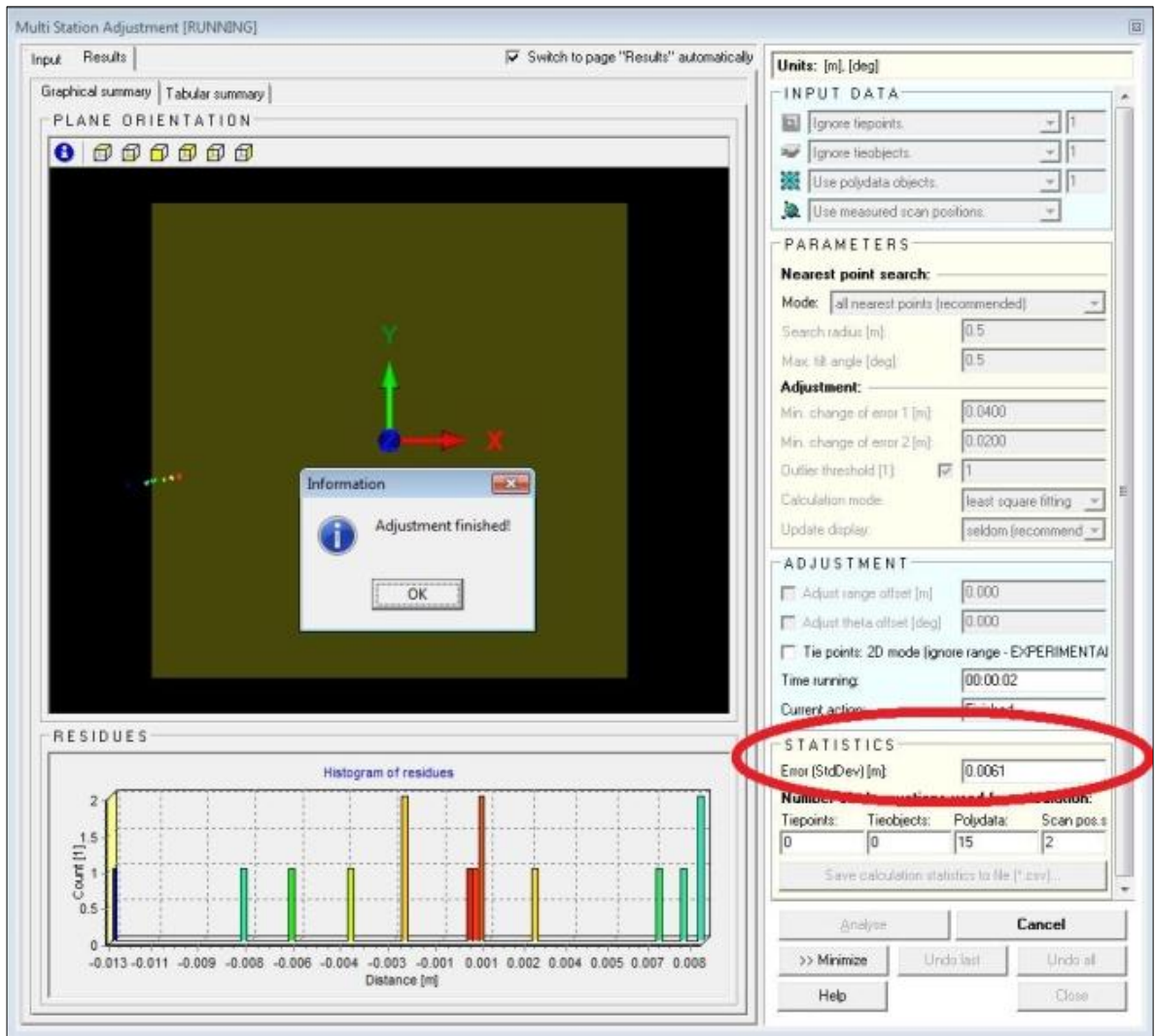


Fuente: Elaboración propia

- Luego se seleccionó la nube de puntos de la posición de escaneo que encontró la mayor cantidad de satélites GPS, ya que de esta manera se garantiza que tenga una mejor lectura de su posición geográfica y por lo tanto, esta nube de puntos se toma como referencia.

- Después se hizo un ajuste aproximado en la localización y orientación de las demás nubes de puntos a la posición de escaneo que fue tomada como referencia. Estos ajustes se hicieron modificando manualmente las coordenadas de la posición (X, Y o Z) y las coordenadas de la orientación (roll, pitch, yaw) de cada una de las demás nubes de puntos, hasta que se encontraran lo más cercana posible a la nube tomada como referencia.
- Finalmente, se usó la herramienta que viene incorporada en el software de RiSCAN PRO llamada *Multi Station Adjustment (MSA)*, que se basa en un algoritmo iterativo de ajuste por mínimos cuadrados entre las distancias de cada una de las nubes de puntos. Este proceso se realiza varias veces ajustando los parámetros en cada iteración, hasta que el error de desviación estándar se encuentre por debajo del centímetro, el valor de la desviación para este proyecto fue de aproximadamente 0.0061m y se visualiza en una caja de texto en la interfaz gráfica del MSA que se encuentra resaltada en la Figura 44.

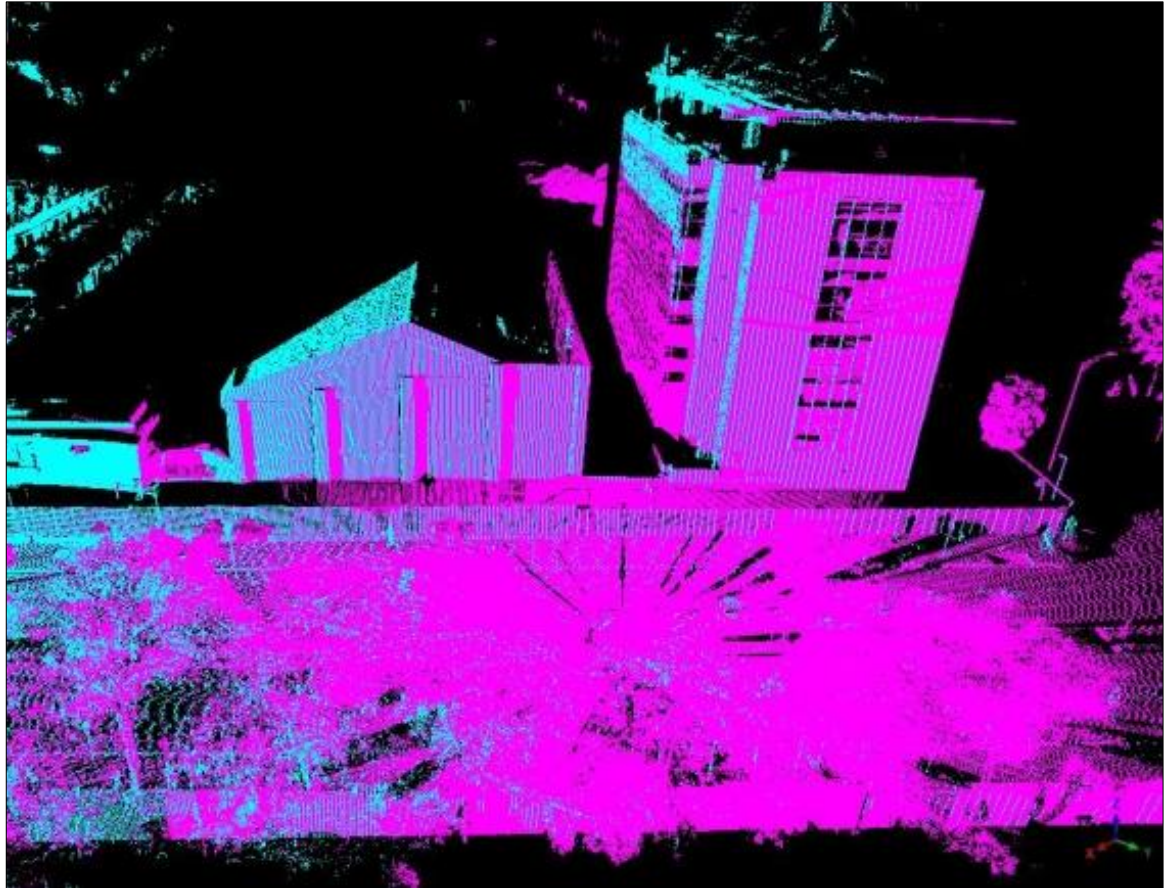
Figura 44. Registro de nube de puntos mediante la herramienta Multistation Adjustment de RiSCAN PRO



Fuente: Elaboración propia

El resultado final del registro de las diez posiciones de escaneo generó una sola nube de puntos como se visualiza en la Figura 45 y está conformada aproximadamente por 67.200.000 puntos. El tiempo que se empleó para el registro de las nubes de puntos fue de 5 horas aproximadamente.

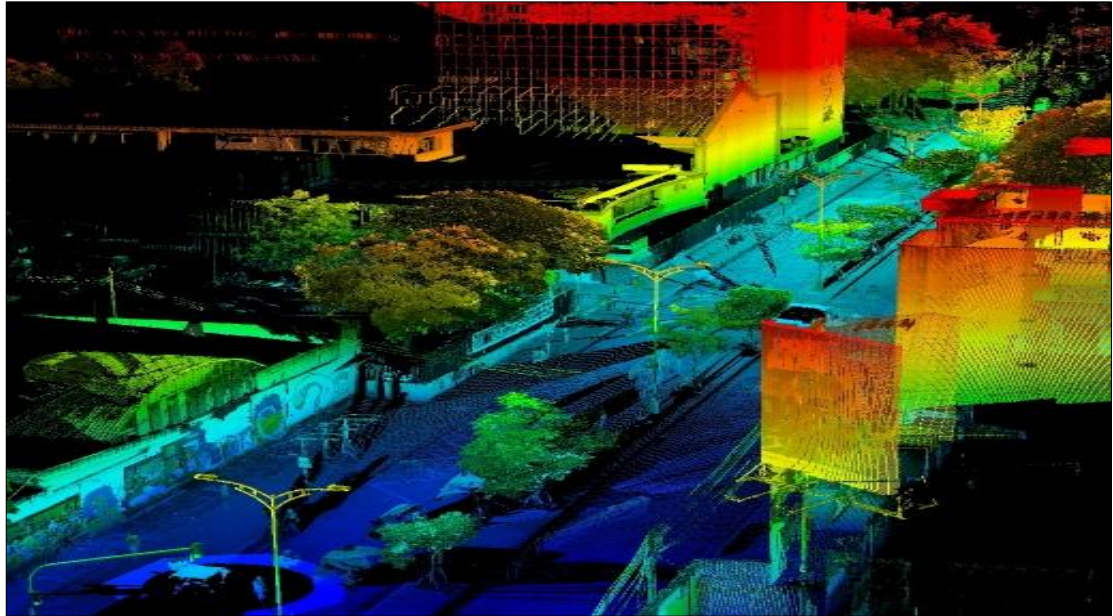
Figura 45. Resultado del Registro de las nubes de puntos de las posiciones Scan009 y Scan010



Fuente: Elaboración propia

Esta nube de puntos registrada está conformada por los valores de las coordenadas XYZ, el valor de reflectancia del material de cada objeto escaneado, la orientación del escáner, el valor de amplitud, entre otros, ver Figura 46. Además, el software RiSCAN PRO tiene una herramienta adicional que permite asignar el valor RGB a cada punto de la nube a partir de las fotografías tomadas en el momento de realizar el escaneo, ver Figura 47.

Figura 46. Nube de puntos registrada del escaneo de la carrera 27 entre calles 14 y 18 clasificada por rangos de alturas



Fuente: Elaboración propia

Figura 47. Nube de puntos registrada del escaneo de la carrera 27 entre calles 14 y 18 con el valor RGB asignado a cada punto



Fuente: Elaboración propia

El software RiSCAN PRO posee otras herramientas adicionales que le permiten hacer diferentes tipos de procesamiento sobre la nube de puntos, como el filtrado del ruido, el filtrado del terreno, entre otros. Sin embargo, para no generar tanta dependencia con este software y llevar a cabo un procedimiento más automático, éstos algoritmos de filtrado fueron desarrollados e implementados en la fase de segmentación de la nube de puntos de este proyecto.

5.4. GEOREFERENCIACIÓN DE LA NUBE DE PUNTOS

Inicialmente se llevó a cabo el proceso de georreferenciación directa, es decir, se utilizaron los datos que recoge el dispositivo GPS que viene incorporado en el escáner, pero en la etapa de post-procesamiento cuando se comparó con los datos de un levantamiento topográfico realizado con tecnología GNSS, se evidenció un error de aproximadamente 50 cm. Por esta razón, se tomó la decisión de realizar el proceso de georreferenciación de forma indirecta, que consiste en escoger ciertos puntos en la escena, comúnmente denominados *puntos de control*, que son georreferenciados mediante equipos de alta precisión como los GNSS RTK, para luego ser ubicados en las nubes de puntos de cada posición de escaneo y mediante una herramienta proporcionada por el software RiSCAN PRO se realiza el proceso de georreferenciación de toda la nube.

Los equipos utilizados para este proceso fueron proporcionados por el grupo de investigación Geomática y consisten en dos dispositivos GNSS RTK de alta precisión de la marca TOPCON modelo GR-3, ver Figura 48, que consisten en dos receptores que reciben señales de diferentes constelaciones de satélites y envía correcciones en tiempo real. Estos receptores tienen las siguientes ventajas:

- La precisión con la cual el receptor GNSS establece el valor de la coordenada del punto de control tiene un error menor a 1 cm.

- Cuando se trabajan con los dos equipos, se puede establecer uno como *Base* estática sobre una coordenada conocida de una red geodésica y el otro como equipo *Móvil* (Rover) para recolectar las coordenadas y al mismo tiempo va haciendo correcciones con el equipo base.

Figura 48. Equipo GNSS RTK marca TOPCON GR-3



Fuente: Elaboración propia

El método de georreferenciación indirecta se llevó a cabo con base en las indicaciones que recomienda RIEGL y que se encuentran consignadas en el tutorial del software RiSCAN PRO. Este proceso parte de que cada posición de escaneo posee su propio sistema de coordenadas locales (SOCS – Scanner’s Own Coordinate System), es decir, la posición y orientación del escáner dentro del sistema de coordenadas del proyecto. La posición y orientación se pueden describir mediante 6 parámetros (3 para la posición y 3 para la orientación) o por

medio de una matriz de transformación. Este software utiliza una matriz de 4x4 denominada *MSOP* que representa la posición y orientación del escáner.

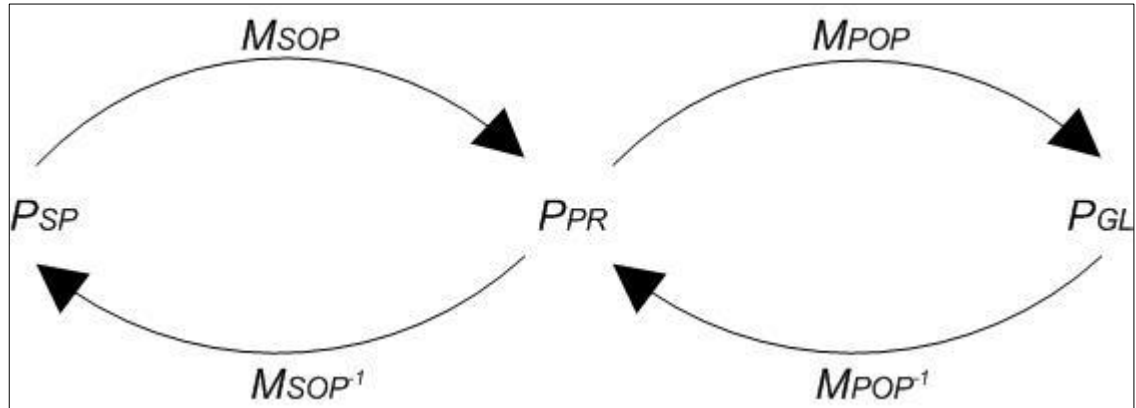
$$M_{SOP} = \begin{matrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix}$$

Esta matriz consta de 9 parámetros que reflejan la rotación (r_{11} al r_{33}) y 3 parámetros para la traslación (t_1 al t_3).

Cada posición de escaneo mantiene los datos de su posición en un archivo binario con extensión .3DD, de igual manera, cada posición mantiene su propia matriz SOP con el fin de transformar los datos del sistema de coordenadas locales SOCS al sistema de coordenadas del proyecto (PRCS – PProject Coordinate System), cuyo proceso consiste en multiplicar cada uno de los puntos por la matriz MSOP de la posición de escaneo.

En caso de que un punto P tenga que ser transformado de un sistema de coordenadas local a un sistema de coordenadas global, primero se multiplica con la matriz MSOP de la posición de escaneo para transformarse al sistema de coordenadas del proyecto, luego se multiplica por la matriz de MPOP el cual transforma del sistema de coordenadas del proyecto al sistema de coordenadas global. Este proceso también se puede realizar de forma inversa tal como se representa en la Figura 49.

Figura 49. Pasos para la transformación del sistema de coordenadas del escáner de un punto P al sistema de coordenadas del proyecto, luego al sistema de coordenadas global y viceversa



Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, las etapas que se siguieron para la georreferenciación de la nube de puntos utilizada para este proyecto fueron:

5.4.1 Configuración y establecimiento del receptor Base: Este primer paso consistió en establecer un receptor como Base sobre algún vértice materializado, para este caso, se escogió un punto que fue levantado en el 2006 cuya coordenada está documentada y forma parte de la red MAGNA-SIRGAS de Colombia adoptada por el IGAC. El nombre del vértice materializado es GPS-ST-UIS-1 y está localizado al costado norte del estadio 1º de Marzo junto al monumento de las banderas de la Universidad Industrial de Santander, ver Figura 50.

Figura 50. Ubicación del vértice GPS-ST-UIS-1 en la Universidad Industrial de Santander



Fuente: Elaboración propia

A este receptor Base se le ingresó el valor de las coordenadas de este vértice materializado, la cual se encuentra en el documento “PROYECTO RED GEODÉSICA – UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER”. El sistema de coordenadas utilizado es el del Observatorio Astronómico de Bogotá y se encuentran como valores geodésicos, geocéntricos, planos y cartesianos. Para este caso, como los equipos trabajan con el mismo sistema de referencia, se escogieron las coordenadas planas Gauss-Kruger y la altura elipsoidal del punto como se visualiza en la Tabla 9.

Tabla 9. Coordenadas GPS-ST-UIS-1

Norte	1.281.577,559 m
Este	1.105.938,129 m
Altura Elipsoidal	1006,342 m

Sobre este vértice es donde se monta el equipo Base cuya coordenada conocida se utiliza para inicializar el equipo, ver Figura 51, es decir, el receptor calcula su localización a partir de los satélites que está detectando, luego, se le ingresan los valores del vértice para que sean comparados con estas coordenadas calculadas con el fin de hacer correcciones, para luego ser enviadas al receptor móvil.

Figura 51. Configuración del receptor Base sobre el vértice GPS-ST-UIS-1



Fuente: Elaboración propia

5.4.2 Levantamiento de puntos con el receptor Móvil. Una vez que el equipo Base empezó a recibir correcciones, se procedió a trasladar el receptor Móvil a los puntos que previamente fueron marcados a lo largo de la carrera 27 entre las calles 14 y 18. En la Figura 52 se visualiza una muestra de los puntos de control georreferenciados, en este caso, se muestran los puntos PC013, PC018 y PC028. El equipo Móvil fue configurado de tal manera que, sólo recolectara medidas cuando la desviación del error estuviera por debajo de 1 cm., de igual manera, por cada punto el recolector tomaba 5 lecturas las cuales las promediaba para calcular su coordenada exacta.

Figura 52. Levantamiento de las coordenadas de los Puntos de Control 13,18 y 28 en la Cra. 27 entre calles 14-18



Fuente: Elaboración propia

Se levantaron un total de 19 puntos a lo largo de la vía cuyos datos se encuentran representados en la Tabla 10 junto con el valor de la desviación del error.

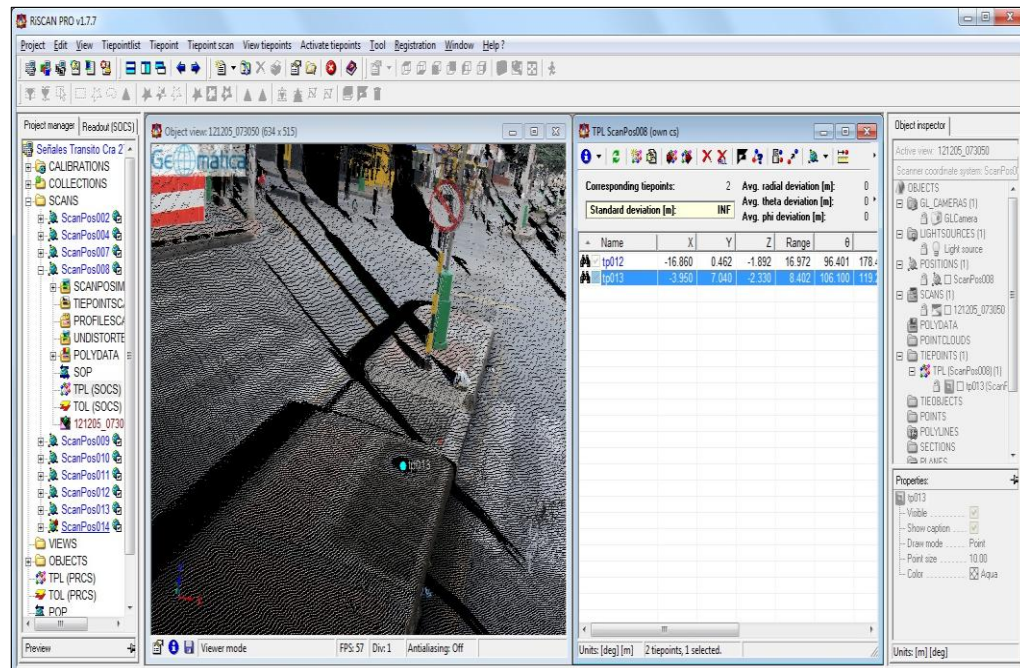
Tabla 10. Coordenadas de la Base y de los Puntos de Control levantados en la Cra. 27 entre calles 14 y 18

Name	Grid Northing (m)	Grid Easting (m)	Elevation (m)	Std Dev Hz (m)
BASE	1.281.577,23	1.105.938,13	1.005,77	
P11	1.281.560,50	1.105.529,39	985,85	0,002
P12	1.280.791,92	1.105.736,84	1.006,68	0,003
P13	1.280.803,68	1.105.745,29	1.006,28	0,002
P14	1.280.788,76	1.105.755,41	1.007,14	0,003
P15	1.280.760,90	1.105.759,27	1.008,13	0,002
P16	1.280.712,26	1.105.766,85	1.009,63	0,002
P17	1.280.696,18	1.105.769,56	1.010,16	0,002
P18	1.280.668,54	1.105.773,86	1.011,02	0,002
P19	1.280.675,02	1.105.765,33	1.010,90	0,002
P20	1.280.663,24	1.105.758,86	1.010,98	0,002
P21	1.280.692,59	1.105.762,25	1.010,38	0,002
P22	1.280.735,48	1.105.747,70	1.008,75	0,002
P23	1.280.628,49	1.105.764,24	1.012,01	0,002
P24	1.280.647,23	1.105.777,23	1.011,61	0,003
P25	1.280.612,91	1.105.766,17	1.012,48	0,003

Name	Grid Northing (m)	Grid Easting (m)	Elevation (m)	Std Dev Hz (m)
P26	1.280.585,06	1.105.771,37	1.013,34	0,003
P27	1.280.564,10	1.105.774,92	1.013,90	0,002
P28	1.280.568,10	1.105.790,25	1.013,94	0,003
P29	1.280.545,02	1.105.778,05	1.014,17	0,003
P30	1.280.519,48	1.105.782,35	1.014,09	0,002
P31	1.280.471,66	1.105.789,86	1.013,84	0,002

5.4.3 Creación de los Puntos de Control en la Nube de Puntos. Con los valores de los puntos de control descargados del colector del equipo GNSS, se localizaron como *Puntos de Enlace* – TPL (SOCS – Scanner’s Own Coordinate System) en cada una de las secciones de la nube de puntos por medio del software RiSCAN PRO, en la Figura 53, se muestra un ejemplo de la localización del punto de enlace tp013 en la posición de escaneo ScanPos008, que corresponde al punto de control PC013 tomado con el receptor Móvil.

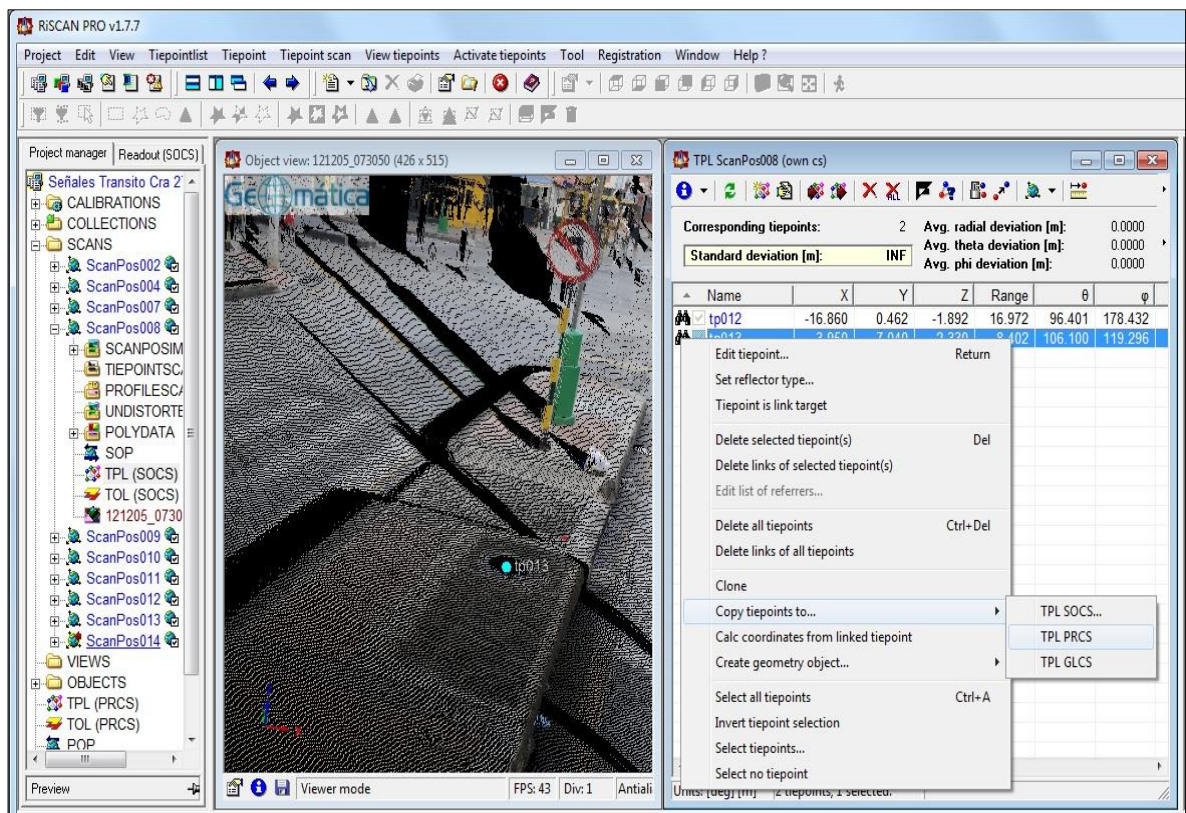
Figura 53. Punto de Enlace tp013 creado en la posición de escaneo ScanPos008



Fuente: Elaboración propia

Luego, todos los Puntos de Enlace de cada una de las posiciones de escaneo son trasladados al listado de Puntos de Enlace del Proyecto – TPL (PRCS – Project Coordinate System), tal como se muestra en el ejemplo de la Figura 54.

Figura 54. Traslado del Punto de Enlace tp013 del Sistema de Coordenadas de la Posición de Escaneo (SOCS) al Sistema de Coordenadas del Proyecto (PRCS)



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 55 se visualiza el resultado de la lista de los Puntos de Enlaces del Proyecto – TPL (PRCS) que fueron copiados desde cada una de las posiciones de escaneo.

Figura 55. Listado de los Puntos de Enlace del Proyecto TPL (PRCS) trasladados desde cada una de las posiciones de escaneo

Project manager | Readout (PRCS)

TPL (PRCS (own cs))

Corresponding tiepoints: 13 Avg. radial deviation [m]: -0.0017
 Standard deviation [m]: 0.0516 Avg. theta deviation [m]: 0.0008
 Avg. phi deviation [m]: -0.0015

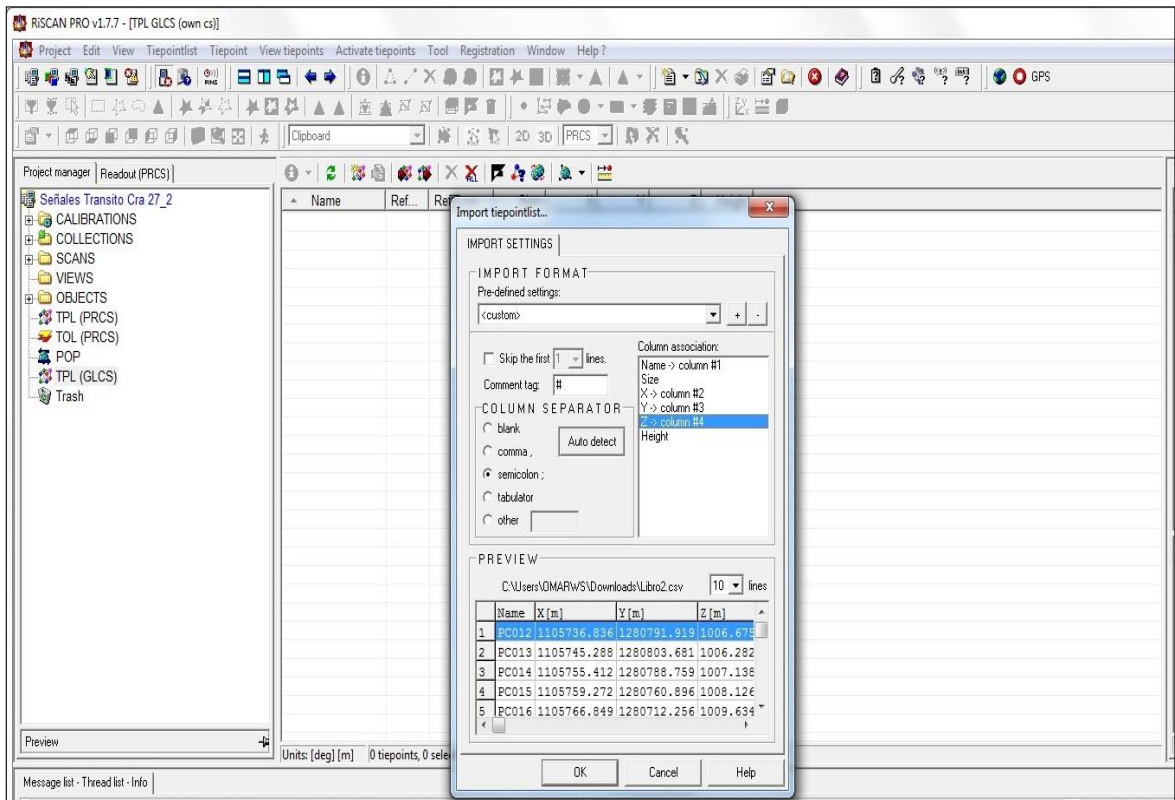
Name	Link	Ref...	RefType	Size	X	Y	Z	Height	σ X	σ Y	σ Z	mean X	mean Y
tp012		1		0.00	-60.955	323.241	1011....	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
tp013		1		0.00	-52.436	334.962	1010....	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
tp016		1		0.00	-31.593	243.307	1014....	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
tp017		1		0.00	-28.981	227.265	1014....	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
tp018		1		0.00	-24.905	199.616	1015....	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
tp019		1		0.00	-33.338	206.122	1015....	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
tp020		1		0.00	-39.919	194.424	1015....	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
tp021		1		0.00	-36.326	223.711	1014....	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
tp022		1		0.00	-50.515	266.661	1013....	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
tp024		1		0.00	-21.704	178.173	1016....	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
tp025		1		0.00	-32.972	144.203	1016....	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
tp029		1		0.00	-21.794	76.048	1018....	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
tp030		1		0.00	-17.695	50.483	1018....	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Units: [deg] [m] 13 tiepoints, 0 selected.

Fuente: Elaboración propia

El paso siguiente consistió en importar todos los valores de los Puntos de Control tomados por el GNSS en formato .CSV al listado de Puntos de Control Global – TPL (GLCS – GLocal Coordinate System), tal como se visualiza en la Figura 56.

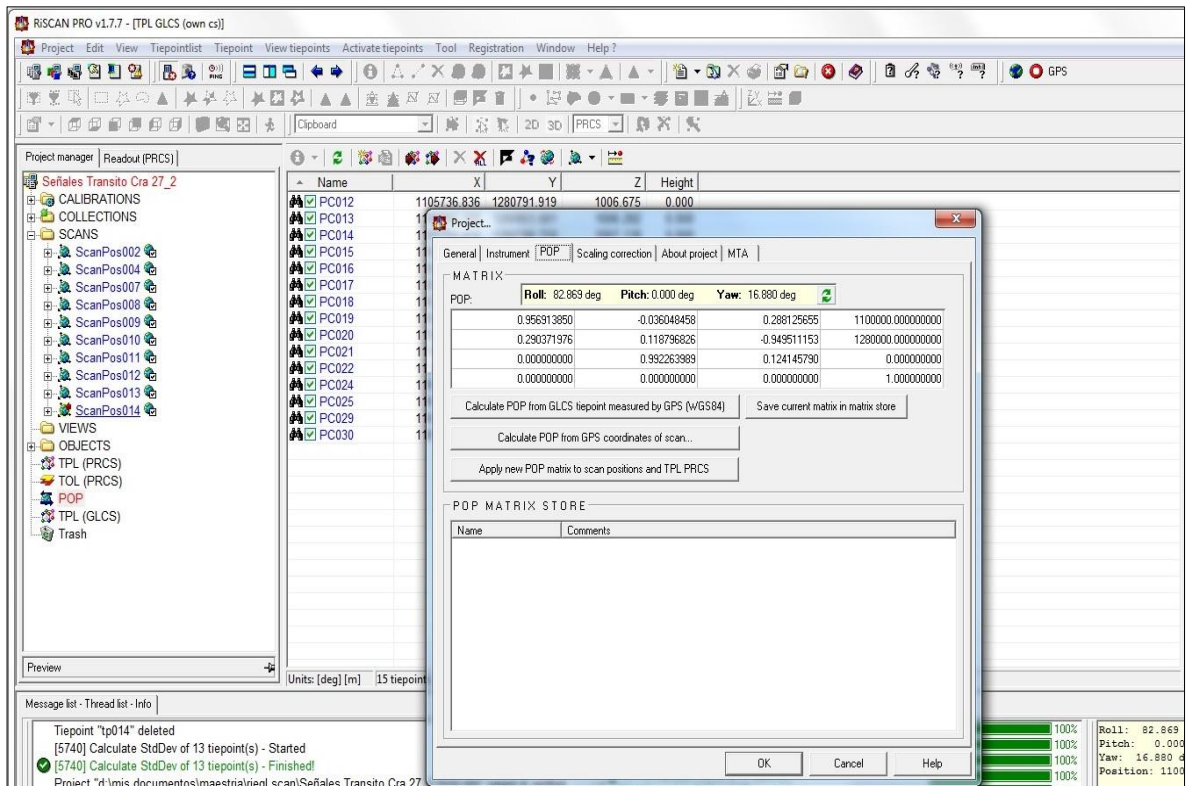
Figura 56. Carga de los Puntos de Control levantados con GNSS al listado de Puntos de Enlace del Sistema Global (GLCS)



Fuente: Elaboración propia

Con el listado de los Puntos de Control Global – TPL (GLCS) se realiza en cálculo de la matriz de transformación del sistema de coordenadas del proyecto al sistema de coordenadas global, denominada *Matriz POP* (del inglés *Project Orientation and Position*) tal como se visualiza en la Figura 57.

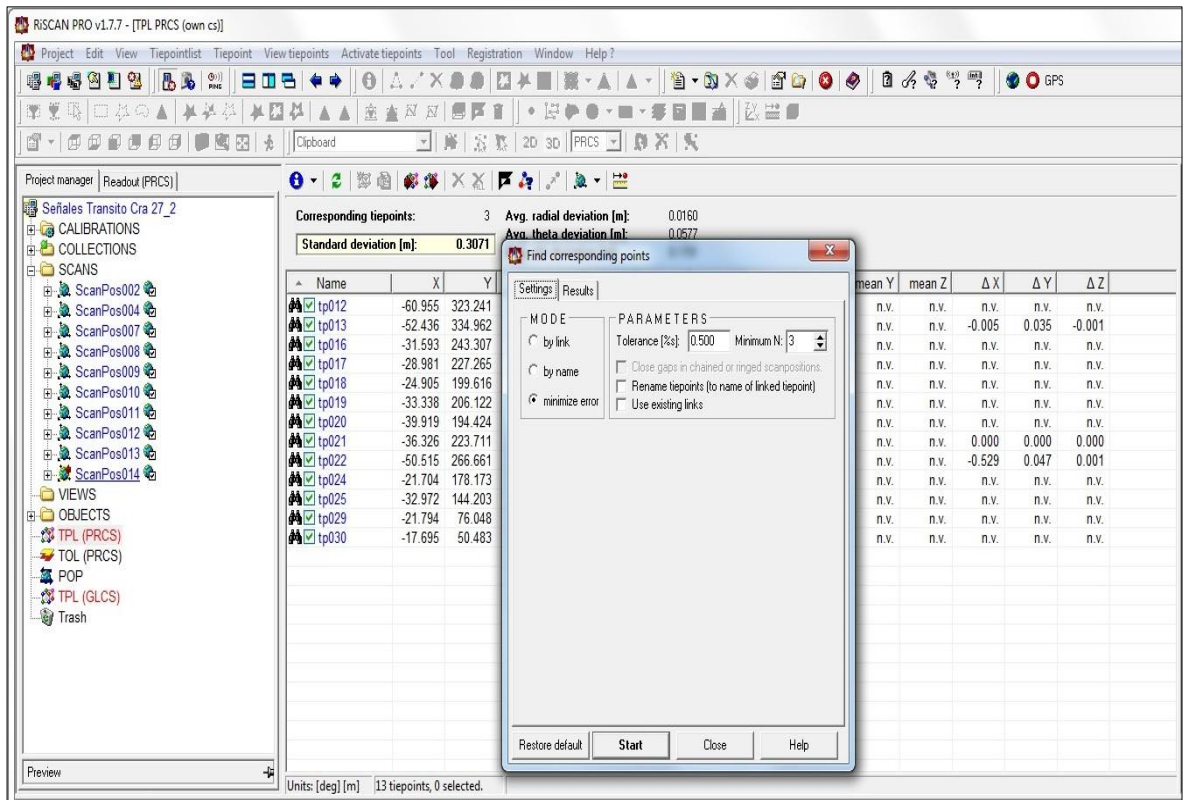
Figura 57. Cálculo de la Matriz de Transformación POP (Project Orientation and Position)



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, con el listado de los Puntos de Enlace del Proyecto – TPL (PRCS) se ejecutó la operación “*Find corresponding points...*”, ver Figura 58, que consiste en encontrar cuáles Puntos de Enlace de cada posición de escaneo TPL (SOCS) corresponde a los Puntos de Control cargados en TPL (GLCS).

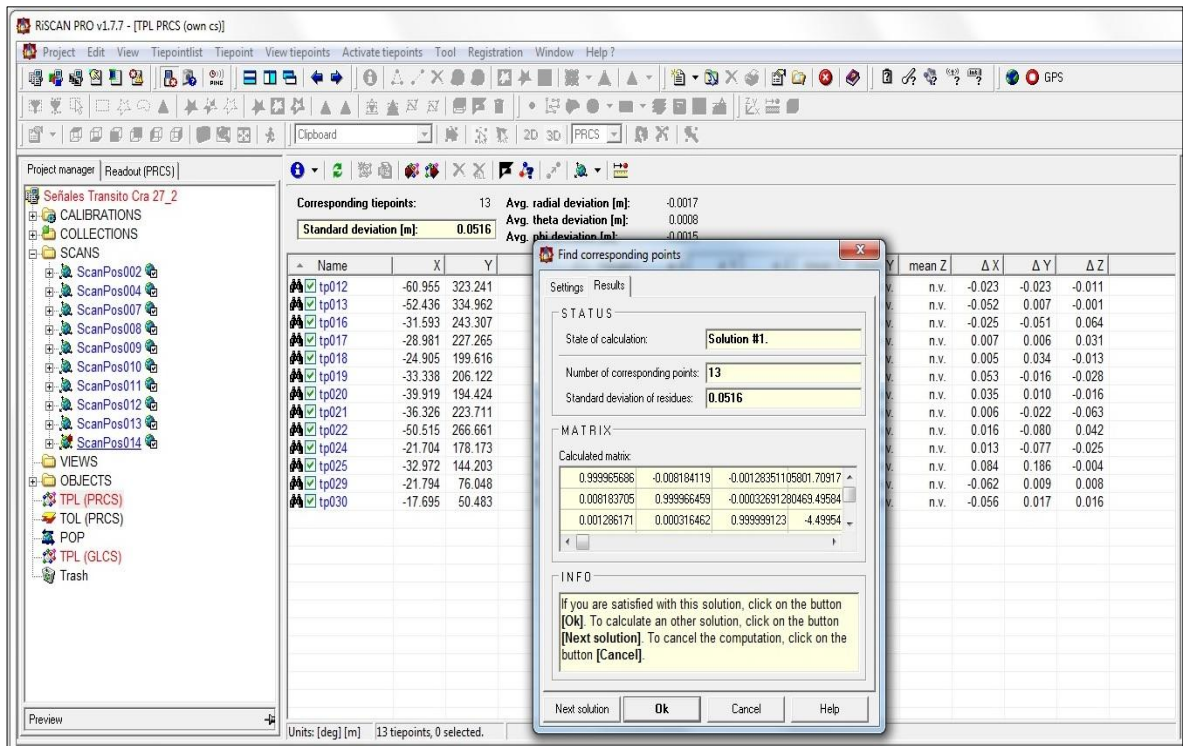
Figura 58. Correspondencia entre los Puntos de Control del Proyecto con los Puntos de Enlace de cada posición de escaneo



Fuente: Elaboración propia

Con los Puntos de Enlace encontrados, el software aplica la transformación de las coordenadas locales de todos los puntos a coordenadas globales por medio de la Matriz POP iterando varias veces hasta que el error de desviación sea muy pequeño, para este caso el error del ajuste fue de 5 cm aproximadamente, como se muestra en la Figura 59.

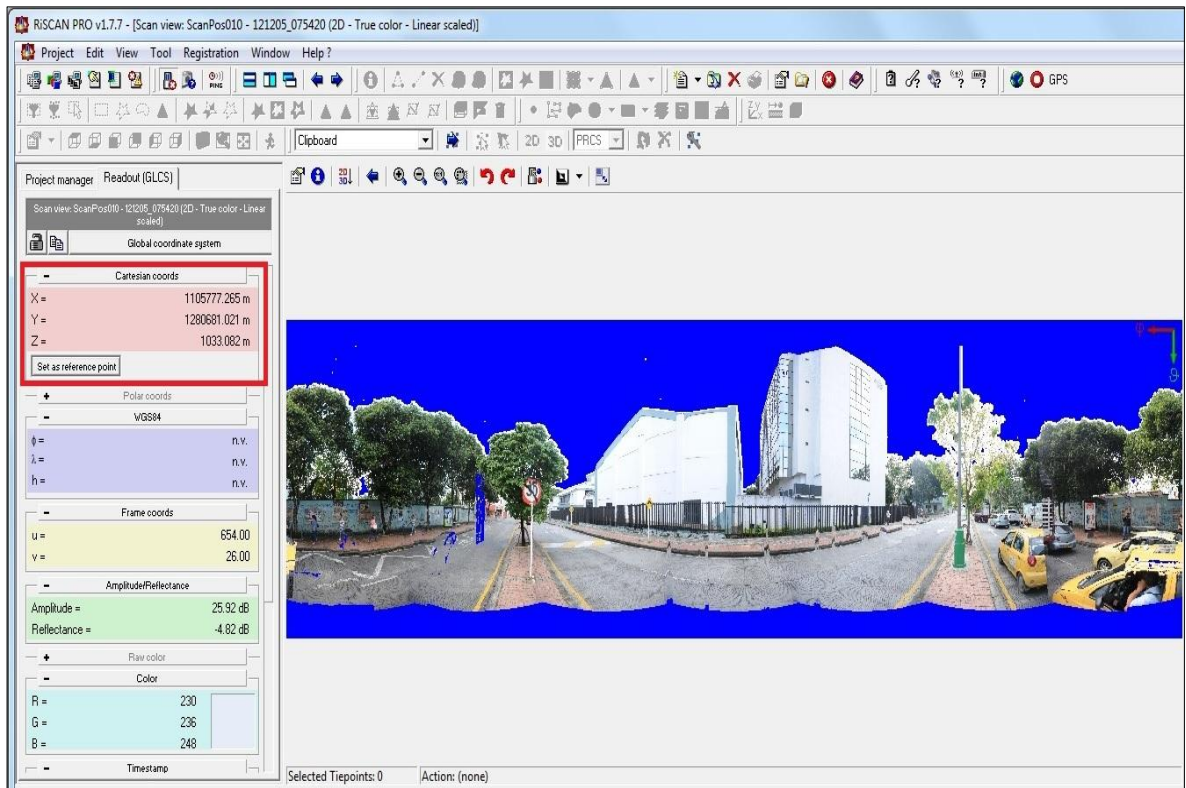
Figura 59. Cantidad de Puntos de Enlace encontrados, Desviación estándar y Cálculo de la Matriz de Transformación



Fuente: Elaboración propia

El resultado de la transformación se visualiza en la Figura 60, donde en la parte izquierda del software se muestran las coordenadas globales de cada punto de la posición de escaneo Scan008.

Figura 60. Resultado de la Georreferenciación de la posición de escaneo ScanPos010



Fuente: Elaboración propia

5.5. PRE-PROCESAMIENTO DE LA NUBE DE PUNTOS

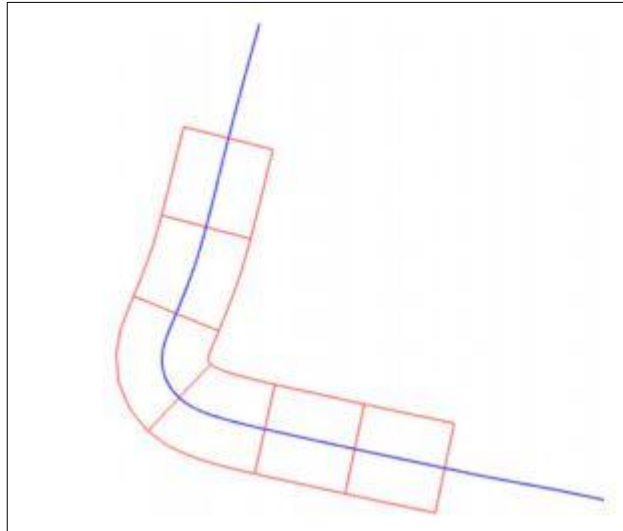
Una vez que se tiene la nube de puntos registrada y georreferenciada, se sigue con la etapa de pre-procesamiento, que consiste en hacer un análisis sobre la cantidad y distribución de los puntos, con el fin de encontrar una estrategia adecuada para optimizar los tiempos de procesamiento, debido al gran volumen de información que conforma a esta nube de puntos.

Como se mencionó anteriormente, la cantidad total de puntos registrados fue de 67.200.000 puntos aproximadamente y cada uno de ellos contiene como mínimo

la información de las coordenadas XYZ, el valor de reflectancia y el valor RGB; Por lo tanto, al convertir esta nube de puntos en una matriz para utilizarla en los algoritmos de segmentación y clasificación, ésta queda conformada por un total 67.200.000x7 celdas, lo que se traduce en un costo computacionalmente muy alto al momento de ejecutar cualquier algoritmo sobre esta matriz de puntos.

Para solucionar este problema de tamaño de la información, se tomó como referencia a Shi Pu en [39], el cual propuso una partición de una nube de puntos en secciones de 50 metros de largo por 30 metros de ancho, ver Figura 61. Los 30 metros de ancho se midieron de a 15 metros al lado y lado del separador con el fin de cubrir el área de los andenes, que es donde se encuentran instaladas las señales de tránsito.

Figura 61. Esquema de la partición de una nube de puntos recolectada a lo largo de una vía



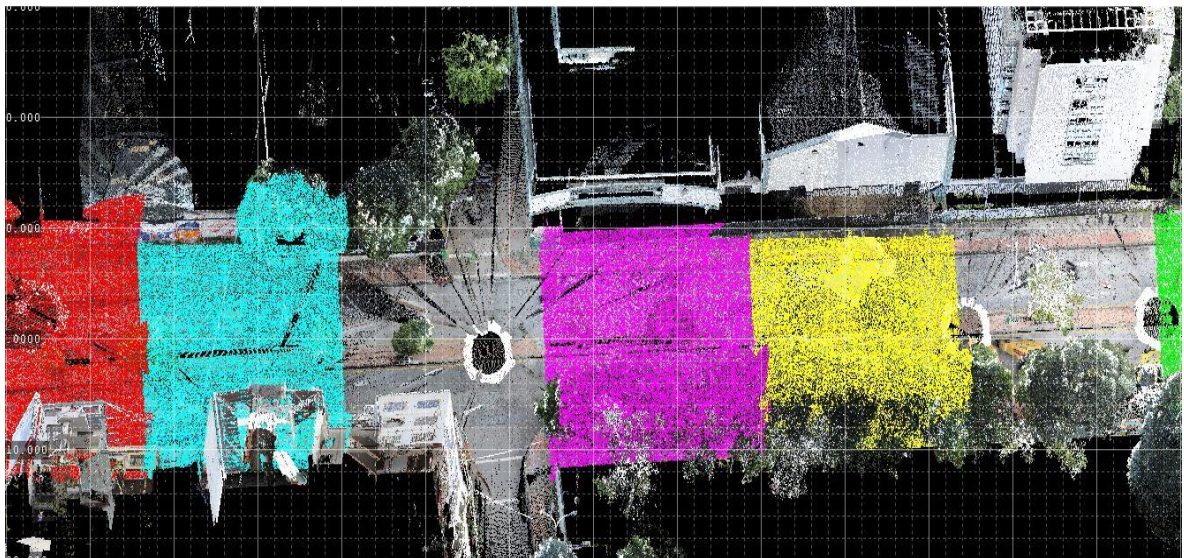
Fuente: Recognizing basic structures from mobile laser scanning data for road inventory studies

Basados en la estrategia anterior, también se realizó la partición de la nube de puntos registrada, pero en este caso se tomó como referencia la cantidad de puntos, ya que en algunas secciones existía más densidad de puntos que en

otras, debido a que en algunas de ellas habían más objetos en la escena o existían objetos de gran tamaño (ej. árboles grandes y frondosos).

Por lo tanto, se hicieron las particiones basadas en la cantidad de puntos, con un tamaño aproximado de 350.000 puntos para cada sección, teniendo en cuenta que, cada sección debe tener aproximadamente 20 metros de ancho con el fin de cubrir las zonas de los andenes y excluir las áreas donde no es posible encontrar señales de tránsito, por ejemplo, las fachadas de las edificaciones, los árboles que se encuentran a los lados y demás objetos que se hallan en cualquier entorno urbano alrededor de una vía. En la Figura 62 se observa algunas de las particiones (en color rojo, cian, fucsia, amarillo y verde) que se hicieron sobre la nube de puntos de este corredor vial.

Figura 62. Partición de la nube de puntos recolectada de la carrera 27 entre calles 14 y 18

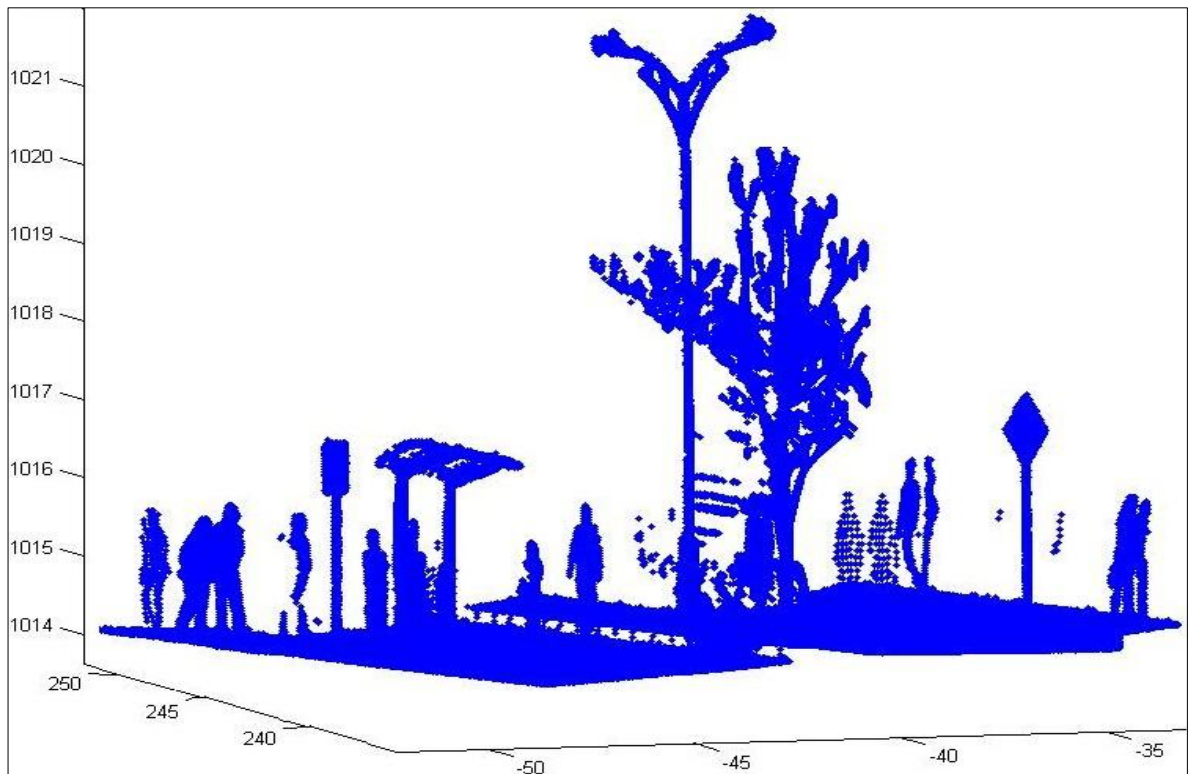


Fuente: Elaboración propia

Como resultado de esta partición se generaron 33 secciones de nubes de puntos, cada una con tamaño aproximado de 350.00 de puntos, pero se seleccionaron aquellas secciones en donde estaban presentes las señales de tránsito con el fin

de ser analizadas con la herramienta desarrollada en este proyecto. En la Figura 63 se visualiza un ejemplo de una sección de la nube de puntos (Sección 8) y en la Tabla 11 se muestran las secciones seleccionadas junto con su cantidad de puntos.

Figura 63. Sección 8 de la Nube de Puntos de la carrera 27 entre calles 14 y 18



Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Tamaño de las secciones de la nube de puntos de la carrera 27 entre calles 14 y 18

Sección	Cantidad de puntos
Sección 1	241.114
Sección 2	415.439
Sección 5	292.753
Sección 8	309.804
Sección 10	449.787

Sección	Cantidad de puntos
Sección 11	387.488
Sección 15	244.923
Sección 17	537.511
Sección 20_1	400.356
Sección 20_2	437.300
Sección 25_1	498.450
Sección 25_2	361.800
Sección 33_1	112.848
Sección 33_2	169.605

5.6. SEGMENTACIÓN DE LA NUBE DE PUNTOS

Antes de llevar a cabo el proceso de segmentación se hizo un filtrado de los puntos que pertenecen al suelo, ya que éstos conforman casi el 40% del total de puntos en cada sección. De esta manera se logró nuevamente reducir el tamaño de los datos lo que se traduce en un menor tiempo de cómputo.

5.6.1 Filtrado del terreno – método de OTSU. Para el proceso del filtrado del terreno primero se utilizó un algoritmo basado en el *método Otsu* [91], que se fundamenta en la extracción de un umbral sobre la distribución de los valores de la coordenada Z de los puntos y que son representados a través de un histograma. Luego de hallar este umbral, se analizaron los puntos que quedaron por debajo de este valor mediante el cálculo de las normales de cada uno de ellos.

5.6.1.1 Fundamentos. El método de Otsu, es una técnica de umbralización que usualmente se utiliza en el tratamiento digital de imágenes. Este método consiste en extraer un umbral del nivel de gris que separa los píxeles que conforman el objeto de los píxeles que conforman el fondo de la imagen. Esta segmentación se basa en “la homogeneidad de la región”, la cual se mide usando la varianza, que

es la medida de dispersión de valores (dispersión de los niveles de gris para el caso del tratamiento digital de imágenes).

El método Otsu calcula el valor umbral de forma que la dispersión dentro de cada segmento sea lo más pequeña posible, pero al mismo tiempo, entre segmentos diferentes sea lo más alta posible, esto se logra minimizando la varianza dentro de cada clase.

Para calcular el umbral se establecen dos clases: C_0 como el conjunto de puntos pertenecientes al suelo y C_1 el resto de puntos, cuya suma total es de L valores de la coordenada Z . Por lo tanto, estos dos segmentos están definidos a partir de un valor umbral T que es el valor a calcular:

$$\begin{aligned} \bullet \quad \omega_0 T &= \sum_{i=1}^T P_i \\ \bullet \quad \omega_1 T &= \sum_{i=T+1}^L P_i \end{aligned} \quad (5.6.1)$$

Dónde: $\omega_0 T + \omega_1(T) = 1$

La media de los valores de los puntos que pertenecen al suelo y de los puntos que están por encima de éste respectivamente son:

$$\begin{aligned} \bullet \quad \mu_0 T &= \frac{1}{c_0(T)} \sum_{i=1}^T iP(i) \\ \bullet \quad \mu_1 T &= \frac{1}{c_1 T} \sum_{i=T+1}^L iP_i \end{aligned} \quad (5.6.2)$$

Siendo $E[x]$ la esperanza, entonces:

$$E x = \sum_{i=1}^n x_i P(X = x_i) \quad (5.6.3)$$

Y la media de todas las alturas es:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^L iP(i)}{\sum_{i=1}^L P(i)} = \sum_{i=1}^L iP(i) \quad (5.6.4)$$

Usando análisis discriminante, se definió la varianza entre los puntos del suelo y los que están por encima así:

$$\begin{aligned} \bullet \quad \sigma_0^2 T &= \frac{1}{c_0(T)} \sum_{i=1}^T (i - \mu_0)^2 P(i) \\ \bullet \quad \sigma_1^2 T &= \frac{1}{c_1(T)} \sum_{i=T+1}^L (i - \mu_1)^2 P(i) \end{aligned} \quad (5.6.5)$$

Entonces, como el objetivo es mantener la varianza dentro de cada segmento lo más pequeña posible y conseguir que la varianza entre los dos segmentos sea lo más grande posible se obtiene:

$$Q T = \frac{\sigma_w^2}{\sigma_1^2} \quad (5.6.6)$$

La varianza dentro de los segmentos es:

$$\sigma_w^2 T = \omega_0 \sigma_0^2 + \omega_1 \sigma_1^2 \quad (5.6.7)$$

La varianza entre los segmentos se obtiene:

$$\sigma_B^2 T = \omega_0 (\mu_0 - \mu_T)^2 + \omega_1 (\mu_1 - \mu_T)^2 \quad (5.6.8)$$

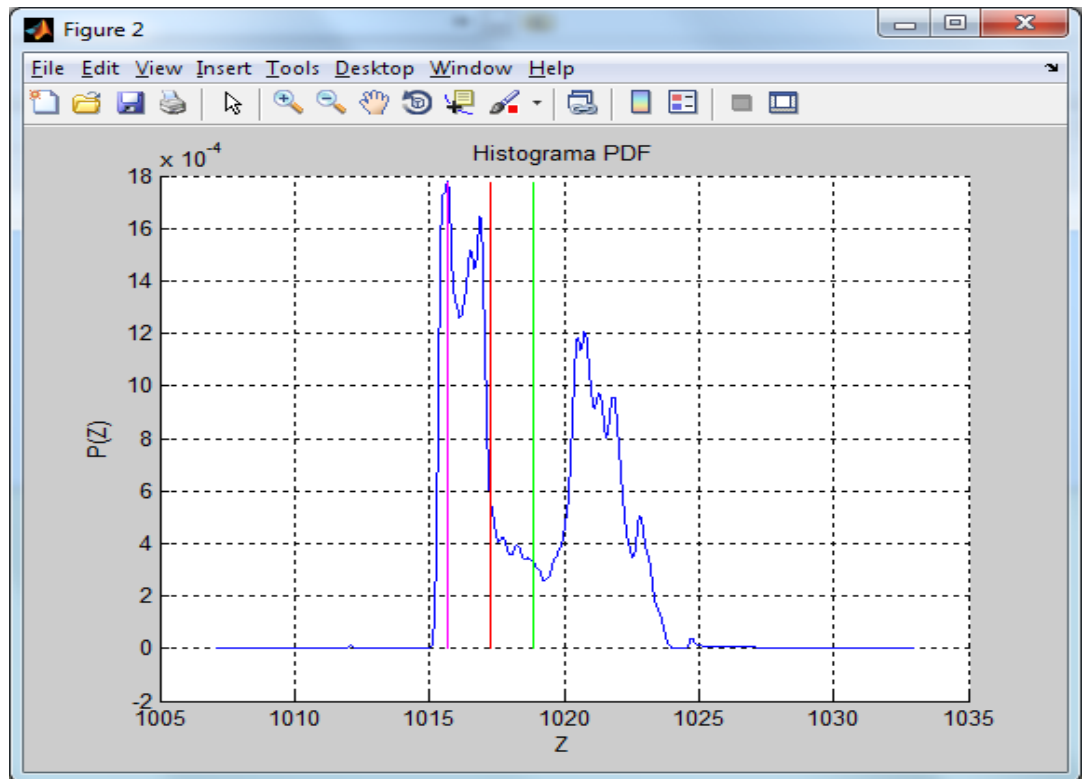
Por lo tanto, el problema se reduce en encontrar el valor de T que maximiza $\sigma_B^2(T)$.

5.6.1.2 Implementación. Para el presente proyecto se utilizó el método Otsu para hallar un umbral aproximado que permita separar los puntos del suelo, de los puntos que conforman los objetos que están por encima de éste; por lo tanto, se tomó como variable de cálculo la coordenada Z de todos los puntos, para representarlos en un histograma normalizado.

En la implementación del algoritmo basado en el método de Otsu para filtrar los puntos que pertenecen al suelo, se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- Se generó un histograma con los valores de la coordenada Z de todos los puntos, ya que esta coordenada representa la altura de los objetos contenidos en la nube de puntos, tal como se visualiza en la Figura 64, donde se puede observar la distribución bimodal que presentan, el cual es una de las condiciones principales para ejecutar el método de Otsu.

Figura 64. Histograma de los valores de la coordenada Z (altura)

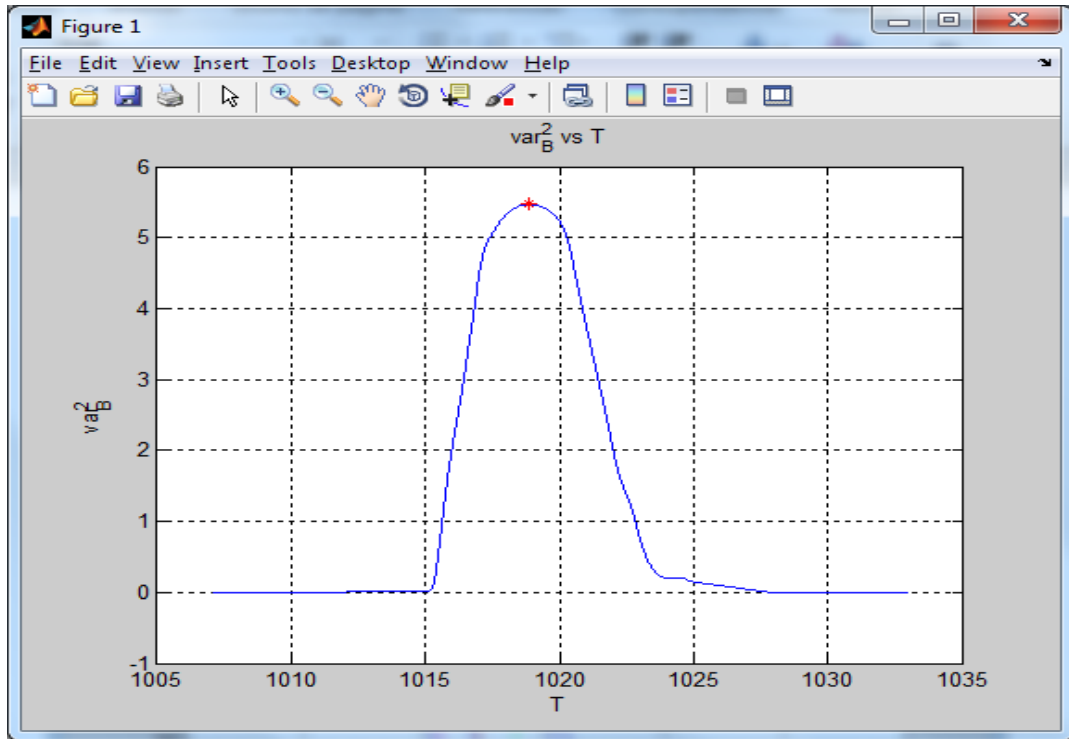


Fuente: Elaboración propia

- Luego se buscó el valor del umbral T en $\sigma_B^2(T)$ que maximice la varianza, este valor es el parámetro que permite separar los puntos del suelo con los puntos de los objetos que se entran encima de éste. En la Figura 65, se representa la varianza de los puntos de los objetos que se encuentran por encima del suelo

evaluado en todo el rango de umbrales, el punto máximo (en color rojo) indica el umbral que divide los puntos del suelo con el resto.

Figura 65. Varianza de los puntos de los objetos que se encuentran encima del suelo (B) vs umbral (T)



Fuente: Elaboración propia

- Para mejorar los resultados del cálculo del umbral T , se utilizó una fórmula que consiste en detectar la coordenada Z de la frecuencia más alta en el histograma (*punto de borde*) que es la línea de color magenta en la Figura 64 y relacionarla con el umbral T que es la línea de color verde en la misma figura, el resultado es un umbral mejorado (línea roja) ubicado entre los dos valores anteriormente mencionados y calculado de la siguiente manera:

$$\text{umbral mejorado} = \text{umbral} - \text{umbral} - \text{borde} * \alpha \quad (5.6.9)$$

Dónde:

$$umbral > borde, umbral \geq 0, borde \geq 0, alpha \in [0,1] \quad (5.6.10)$$

- *Cálculo de Normales:* Debido a las condiciones de desnivel que tiene la vía en estudio, se presentó la situación de que en algunas secciones, el valor del umbral de Otsu quedaba muy por encima del suelo tomando puntos que pertenecían a objetos y en otros casos alcanzaba a quedar por debajo del nivel del suelo. Este problema se presentó debido a que la superficie del suelo no era totalmente horizontal, en algunos casos presentaban bastante desnivel, principalmente en la zona de los separadores, por esta razón, se ajustó el parámetro del umbral de Otsu de manera que siempre quedara a una distancia de 1 metro por encima del nivel del suelo, con el fin de seleccionar la región de la nube de puntos que quedara por debajo de este umbral, para después realizar el proceso de filtrado mediante las normales de cada uno de estos puntos.

El método para segmentar el suelo mediante el cálculo de las normales de los puntos se basó en el trabajo presentado en [34], donde primero se define una cantidad mínima de vecindario de puntos, para el caso de este proyecto se tomó $k = 50$, y después se calcula la matriz de correlación de la siguiente manera:

$$C = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (r_i - r) (r_i - r)^T = \begin{matrix} S_x^2 & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{xy} & S_y^2 & S_{yz} \\ S_{xz} & S_{yz} & S_z^2 \end{matrix} \quad (5.6.11)$$

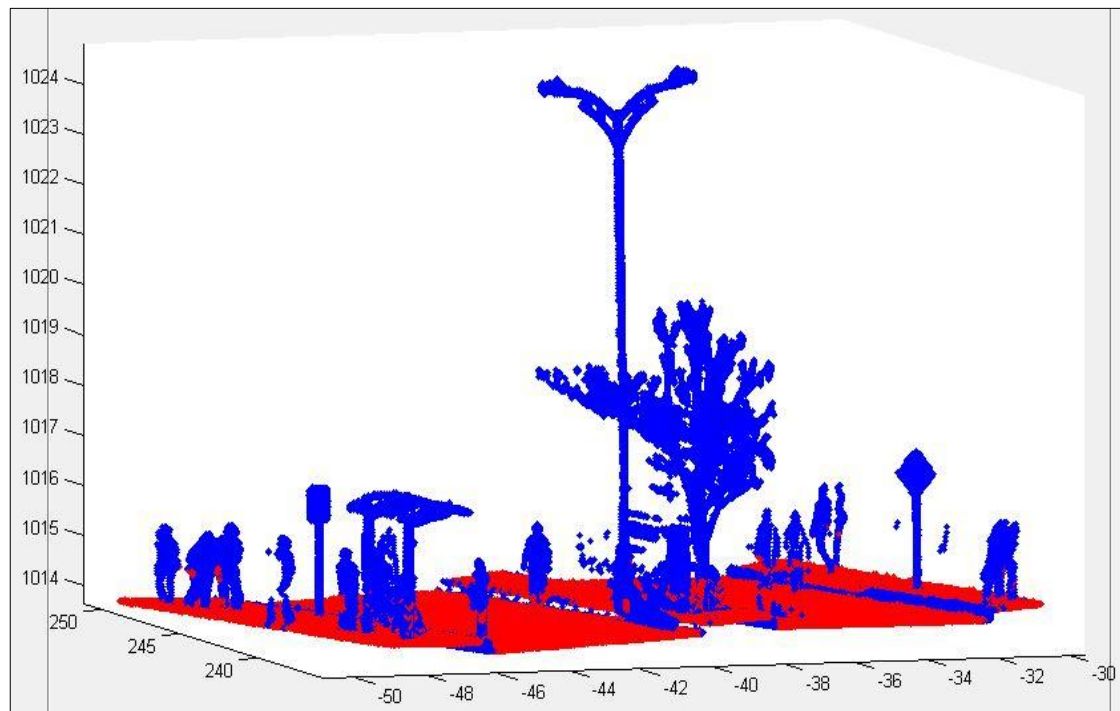
Luego, para todo punto de la vecindad se calculan los eigenvalores λ_s y la superficie normal N , ya que la segmentación se basa en el cálculo del ángulo entre $N\lambda_s$ y N . Dónde:

$$N\lambda_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad (5.6.12)$$

Como se asume que la mayoría de los vectores normales con dirección vertical se encuentran en los puntos que pertenecen a la vía, entonces se ajusta un plano horizontal sobre estos puntos. Finalmente se evalúa el ángulo de cada punto con respecto al plano y aquellos cuyo ángulo está en el rango entre 80° y 100° con respecto a la superficie se identifican como puntos que pertenecen al suelo.

Un ejemplo del resultado de la segmentación de los puntos del suelo con los de los objetos que se encuentran por encima de éste se visualiza en la Figura 66, donde el color rojo representa los puntos del suelo como andenes, sardineles, calzadas y el separador. Mientras que el color azul representa los puntos que pertenecen a los objetos que se encuentran por encima del suelo.

Figura 66. Filtrado de los puntos que pertenecen al Suelo de la Sección 8



Fuente: Elaboración propia

Los resultados del filtrado de los puntos del suelo de cada una de las secciones de la nube de puntos se visualizan en la Tabla 12.

Tabla 12. Resultado de la segmentación basada en Otsu de los puntos del suelo

Sección	Cantidad de puntos total	Cantidad de puntos del suelo	Porcentaje de puntos del suelo
Sección 1	241.114	194.493	80,66
Sección 2	415.439	187.534	45,14
Sección 5	292.753	143.039	48,85
Sección 8	362.589	219.331	60,49
Sección 10	363.132	227.963	62,77
Sección 11	387.488	311.400	80,36
Sección 15	319.309	217.863	68,22
Sección 17	537.511	432.163	80,40
Sección 20_1	400.356	335.436	83,78
Sección 20_2	437.300	378.336	86,51
Sección 25_1	498.450	392.158	78,67
Sección 25_2	316.800	141.345	44,61
Sección 33_1	112.848	58.031	51,42
Sección 33_2	169.605	80.450	47,43

5.6.2 Segmentación basada en la teoría de grafos mediante el método RBNN.

Con el filtrado de los puntos que pertenecen al suelo se reduce considerablemente el tamaño de la nube de puntos hasta casi el 60% de su tamaño original, lo que permite una disminución importante en el tiempo de procesamiento para las etapas siguientes. En adelante se trabajó con los puntos que pertenecen a los objetos que están por encima del suelo.

El método usado para la segmentación de los puntos, se basó fundamentalmente en la teoría de grafos mediante una técnica que fue presentada en [56], llamada *RBNN* del inglés *Radially Bounded Nearest Neighbor* o vecino radialmente más cercano.

5.6.2.1 Fundamentos. El enfoque de la teoría de grafos es una de las técnicas más robustas para la segmentación de los datos en 3D recolectados mediante un escáner láser terrestre [56], debido a que este método puede identificar clústeres (o grupos de puntos con características similares) de diferente forma utilizando solamente el concepto del vecino más cercano. Dentro de este enfoque existen diferentes algoritmos como el *KNN* (del inglés *K-Nearest Neighbor*), el *DBSCAN* (del inglés *Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*), el *Chameleon*, entre otros.

El RBNN también hace parte de este enfoque basado en grafos y su característica principal es que cada nodo es conectado con todos los vecinos que se encuentren alrededor de un radio de distancia que ha sido previamente definido por el usuario.

En la teoría de grafos cada punto P es mapeado a su nodo correspondiente U_i en un grafo dirigido $G(U, E)$, donde $U = \{u_1, \dots, u_n\}$ representa el conjunto de nodos y $E = \{e_1, \dots, e_n\}$ representa el conjunto de aristas. Cada arista está definida por una tripleta $e = \{u_1, u_2, d(u_1, u_2)\}$ que contiene los dos nodos conectados y la distancia entre ellos es $d(u_1, u_2) = d_{1,2} = \rho(P_1, P_2)$. Para el caso de este proyecto se utilizó la distancia euclidiana.

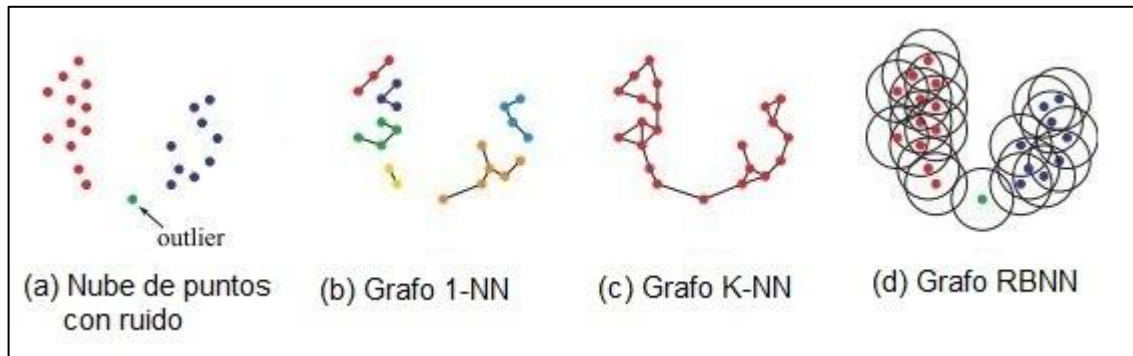
Por lo tanto, la definición del conjunto de aristas en el grafo RBNN es [56]:

$$E_{RBNN} = \{u_i, u_j, d_{i,j} \mid d_{i,j} \leq r, \forall u_i, u_j \in U, i \neq j\} \quad (5.6.13)$$

La principal ventaja del RBNN sobre los demás métodos basados en grafos como el KNN, es que no hace la consulta de todos los vecinos más cercanos por cada nodo que se esté evaluando, sino solamente de los nodos que se encuentran dentro del radio definido, ni tampoco es necesario construir una estructura de grafos, lo que se traduce en una reducción importante en el tiempo de

procesamiento. Otra ventaja importante es la robustez en datos con presencia de ruido, ver Figura 67.

Figura 67. Comparación del desempeño en la segmentación basada en grafos



Fuente: A clustering method for efficient segmentation of 3D laser data - K. Klasing, D. Wollherr, M. Buss

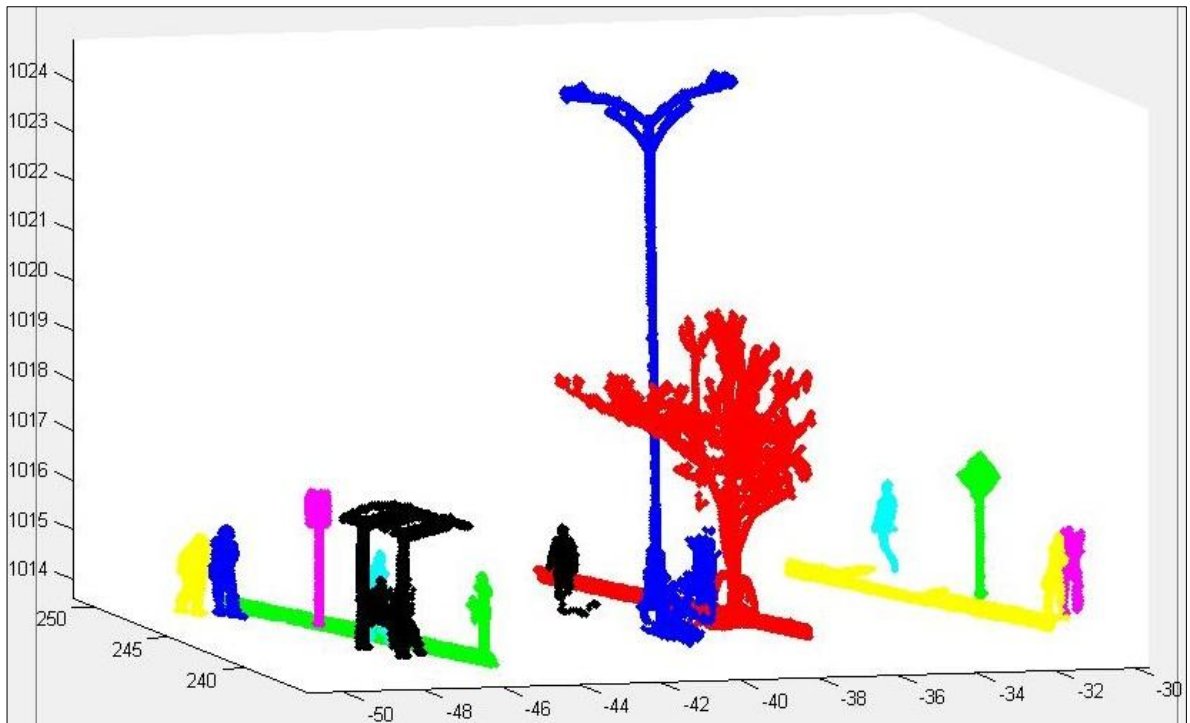
5.6.2.2 Implementación. Para llevar a cabo el proceso de segmentación basada en grafos mediante el algoritmo de RBNN se realizaron los siguientes pasos:

- Se hace un recorrido por todos los puntos de la nube en el orden en que han sido almacenados en el vector.
- Si el punto actual ya ha sido etiquetado a un clúster entonces se analiza el siguiente punto.
- Para cada punto que aún no haya sido etiquetado:
 - Se buscan los vecinos más cercanos dentro del radio definido por el usuario.
 - Si alguno de sus vecinos ya ha sido etiquetado a un clúster, entonces, se asigna esta misma etiqueta al punto actual y todos sus vecinos que aún no han sido etiquetados.
 - Si el punto actual ya ha sido etiquetado a algún clúster y existen vecinos que también han sido etiquetados a otros clústeres, entonces, se unen todos esos puntos en un solo clúster.

- Finalmente, los clústeres que tienen menos cantidad de puntos que la cantidad mínima definida por el usuario, son considerados como ruido y por consiguiente eliminados.

Un ejemplo del resultado de la segmentación basada en la teoría de grafos sobre una de las secciones de la nube de puntos (Sección 8) se visualiza en la Figura 68. Y los resultados de esta segmentación se representan en la Tabla 13.

Figura 68. Resultado de la segmentación basada en el algoritmo RBNN de la Sección 8



Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Resultados de la segmentación basada en el algoritmo RBNN de las secciones de la nube de puntos

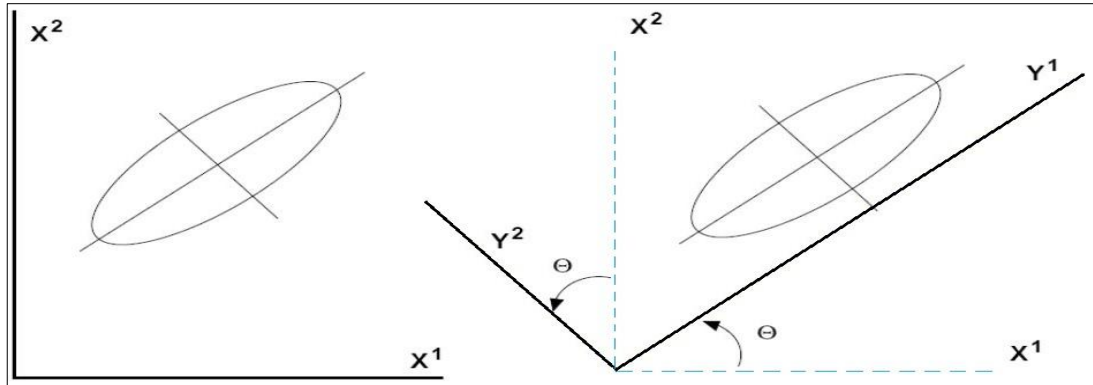
Sección	Número de clústeres detectados	Cantidad de puntos
Sección 1	7	45.590

Sección	Número de clústeres detectados	Cantidad de puntos
Sección 2	13	226.019
Sección 5	14	141.821
Sección 8	15	88.043
Sección 10	12	221.378
Sección 11	8	75.381
Sección 15	7	25.622
Sección 17	7	10.4326
Sección 20_1	14	63.620
Sección 20_2	10	58.281
Sección 25_1	18	98.475
Sección 25_2	19	143.808
Sección 33_1	13	49.147
Sección 33_2	18	80.203

5.6.3 Segmentación basada en el análisis de componentes principales – PCA. El método de análisis de componentes principales o PCA es una forma de identificar patrones en los datos con el fin de expresarlos de manera que se puedan resaltar mejor sus similitudes y diferencias mediante un proceso de transformación, ver Figura 69. Otra ventaja del PCA es que una vez que se han encontrado los patrones en los datos, es posible reducir el número de dimensiones sin pérdida de información relevante. Por lo tanto, este método es uno de los más usados para la extracción de características y reducción del espacio dimensional en reconocimiento de patrones.

En esta etapa, se llevó a cabo la segmentación basada en PCA de cada uno de los clústeres resultantes de la segmentación anterior, con el fin de identificar cuáles de ellos presentaban características lineales (alargadas) que es una de las cualidades propias de las señales de tránsito.

Figura 69. Transformación del espacio mediante el método PCA.



Fuente: Pattern Recognition - S. Theodoridis, K. Koutroumbas

5.6.3.1 Fundamentos. El método PCA se basa en una transformación lineal, en el cual se genera un nuevo sistema de coordenadas de modo que la varianza de mayor tamaño es representada en el primer eje (primer componente principal), la segunda varianza en tamaño en el segundo eje (segundo componente principal), y así sucesivamente.

Para realizar la transformación lineal se construye primero la matriz de covarianzas de los datos, esta matriz es simétrica y por lo tanto contiene una base completa de eigenvectores. Esta transformación conlleva a la reducción en las dimensiones de los datos, lo que permite retener aquellas características que contribuyen más a su varianza, manteniendo un orden de bajo nivel en los componentes principales.

Debido a que el método PCA se fundamenta en el análisis de covarianzas, ha sido una de las técnicas más usadas para la segmentación de nubes de puntos en 3D, ya que se basa en las propiedades geométricas de los objetos contenidos dentro de la nube [31], [71], [92], [93].

El método PCA se inicia mediante la determinación de la matriz de covarianza de un conjunto de datos:

$$\Sigma = Cov X = \begin{matrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} & \sigma_{yz} & \sigma_z^2 \end{matrix} \quad (5.6.14)$$

Donde los elementos de la matriz de covarianzas están definidos de la siguiente manera:

$$\sigma_x^2 = var x = E x^2 - E x^2 = \frac{1}{k} \sum (x_i - \bar{x})^2 \quad (5.6.15)$$

$$\sigma_{xy} = cov x = E xy - E x E y = \frac{1}{k} \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})^2 \quad (5.6.16)$$

$E x$ es el valor esperado para un eje $E x = \bar{x}$, de igual manera $var x$ y $cov xy$ representan la varianza y covarianza respectivamente.

Luego, para realizar el análisis de covarianzas se calculan los eigenvalores (α_i) y eigenvectores (λ_i) de dicha matriz. Los eigenvectores corresponden a los principales componentes (o direcciones) del conjunto de datos y los eigenvalores indican la varianza en la dirección de su correspondiente eigenvector. De esta manera se puede determinar las características geométricas (lineales, planas o volumétricas) que presentan los datos.

5.6.3.2 Implementación. Esta etapa de segmentación mediante el PCA, se tomaron como base los descriptores geométricos locales de cada clúster de puntos identificados en la etapa anterior y se inició con un análisis de los componentes principales de cada uno de ellos, debido a que cada uno tiene su forma geométrica particular. Este análisis se realizó mediante la aproximación de la distribución espacial de los puntos del clúster a un elipsoide con longitud de ejes $\alpha_1 = \bar{\lambda}_i$, el cual presenta tres tipos de forma diferentes:

- $\alpha_1 \gg \alpha_2 \geq \alpha_3$ que tiene sólo una dirección principal: un *vecindario lineal*.

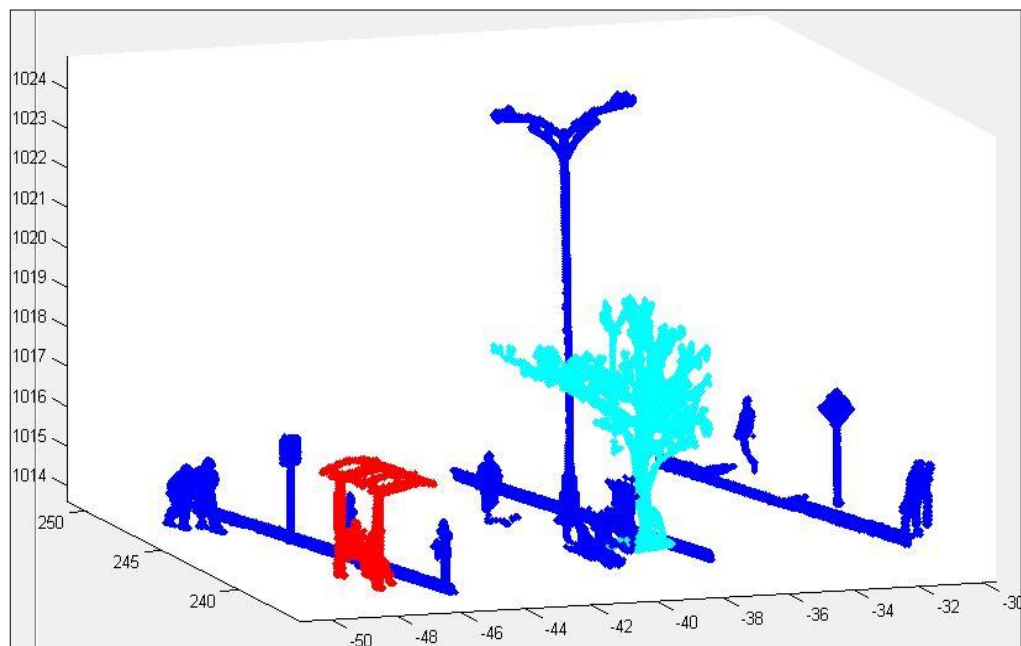
- $\alpha_1 \approx \alpha_2 \gg \alpha_3$ que tiene dos direcciones principales: un *vecindario plano*.
- $\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx \alpha_3$ isotropía: un *vecindario volumétrico*.

Basados en [93] se definieron tres descriptores de dimensionalidad para caracterizar qué tan cerca se encuentra la forma de cada clúster a cada una de las siguientes configuraciones:

- Descriptor lineal: $D_1 = \alpha_1 - \alpha_2 / \alpha_1$
- Descriptor plano: $D_2 = \alpha_2 - \alpha_3 / \alpha_1$
- Descriptor volumétrico: $D_3 = \alpha_3 / \alpha_1$

De esta manera se aplicó la segmentación basada en PCA sobre cada uno de los clústeres y un ejemplo del resultado se visualiza en la Figura 70, donde los segmentos con forma lineal son de color azul, los de forma plana están de color rojo y los de forma volumétrica están en color cian. Los resultados de la segmentación de todas las secciones se representan en la Tabla 14.

Figura 70. Resultado de la segmentación basada en PCA de la Sección 8



Fuente: Elaboración propia

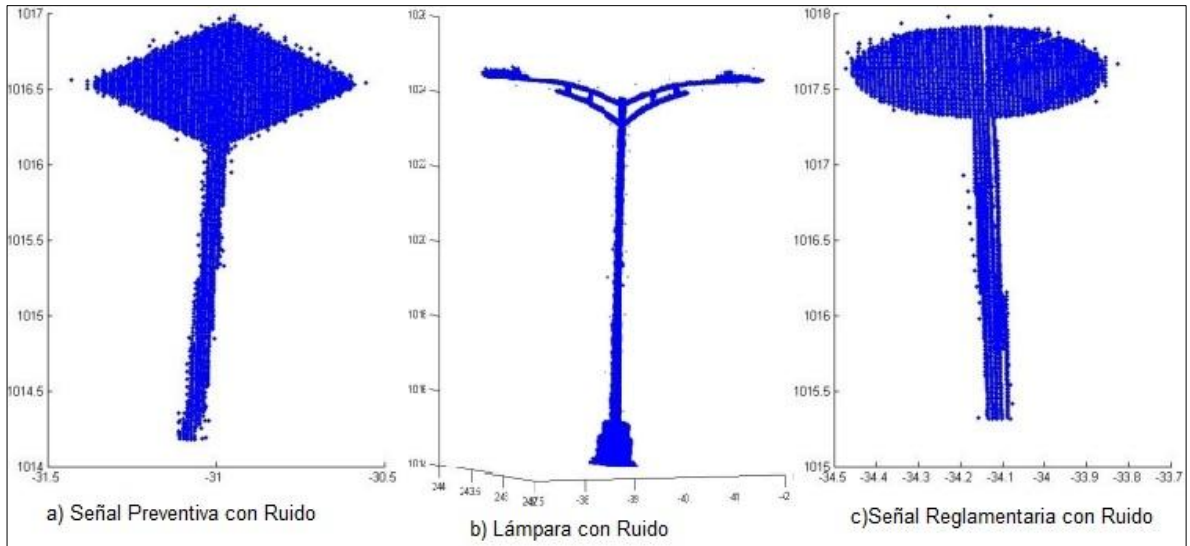
Tabla 14. Resultados de la Segmentación basada en PCA de las secciones de la nube de puntos

Sección	No. de clústeres	No. de clústeres con forma lineal	No. de clústeres con forma plana	No. de clústeres con forma volumétrica
Sección 1	7	7	0	0
Sección 2	13	9	1	3
Sección 5	14	11	2	1
Sección 8	15	13	1	1
Sección 10	12	6	4	2
Sección 11	8	6	2	0
Sección 15	7	6	1	0
Sección 17	7	4	2	1
Sección 20_1	14	9	3	2
Sección 20_2	10	10	0	0
Sección 25_1	18	12	3	3
Sección 25_2	19	13	3	3
Sección 33_1	13	9	2	2
Sección 33_2	18	11	5	2

Los segmentos que se identificaron con forma lineal (alargada) se pueden deducir que pertenecen a objetos como: peatones, postes de luz, semáforos, árboles, señales de tránsito y paraderos. Por lo tanto, estos segmentos fueron seleccionados para utilizarse en la etapa siguiente.

5.6.4 Filtrado del ruido. Antes de seguir con la ejecución de otro tipo de segmentación, fue necesario aplicar un filtrado del ruido que se presentan alrededor de algunos segmentos, ver Figura 71. Este ruido es generado en algunos casos por las condiciones atmosféricas del ambiente como: la polución en el aire, la nubosidad, los objetos altamente reflectantes, entre otros; que hacen que el rayo láser del escáner retorne resultados erróneos.

Figura 71. Segmentos Lineales con presencia de Ruido



Fuente: Elaboración propia

5.6.4.1 Fundamentos. Para llevar a cabo este filtro, se basó en el trabajo presentado en [94], en el cual se implementó una técnica de remoción del ruido en los segmentos con base en las características propias de su densidad, es decir, se basaron en la cantidad promedio de puntos del vecindario dentro de cada segmento. Este método se inicia calculando la media μ y la desviación estándar σ de las distancias de todos los vecinos más cercanos dentro de cada segmento, luego, se eliminan aquellos puntos cuya distancia esté por fuera del rango $\mu \pm \alpha \cdot \sigma$. El valor α depende del tamaño k del vecindario de puntos del segmento analizado. Basados en los experimentos que hicieron de prueba y error sobre varios segmentos, utilizaron los siguientes parámetros: $\alpha = 1$ y $k = 30$, donde este último parámetro corresponde al número mínimo de vecinos. Este proceso logró concluir que los puntos pertenecientes al ruido conformaban aproximadamente el 1% de la cantidad total de puntos de cada segmento.

5.6.4.2 Implementación. La implementación del algoritmo para el filtrado del ruido de los segmentos alargados se llevó a cabo de la siguiente manera:

- La nube de puntos de cada segmento se organizó mediante una estructura de árbol *kd-tree*, para optimizar el tiempo de búsqueda de los vecinos más cercanos.
- Por cada punto se aplicó el algoritmo de los k vecinos más cercanos, donde el mejor valor de la cantidad de vecinos fue de $k = 10$ y que se estableció con base a los experimentos de prueba y error.
- Con todas las distancias obtenidas de los k vecinos más cercanos, se calculó la distancia máxima para establecerla como el radio de alcance de la hiperesfera cuyo centro es el punto que está siendo analizado.
- Luego se calculó el volumen de la hiperesfera de cada punto:

$$V(x) = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \quad (5.6.17)$$

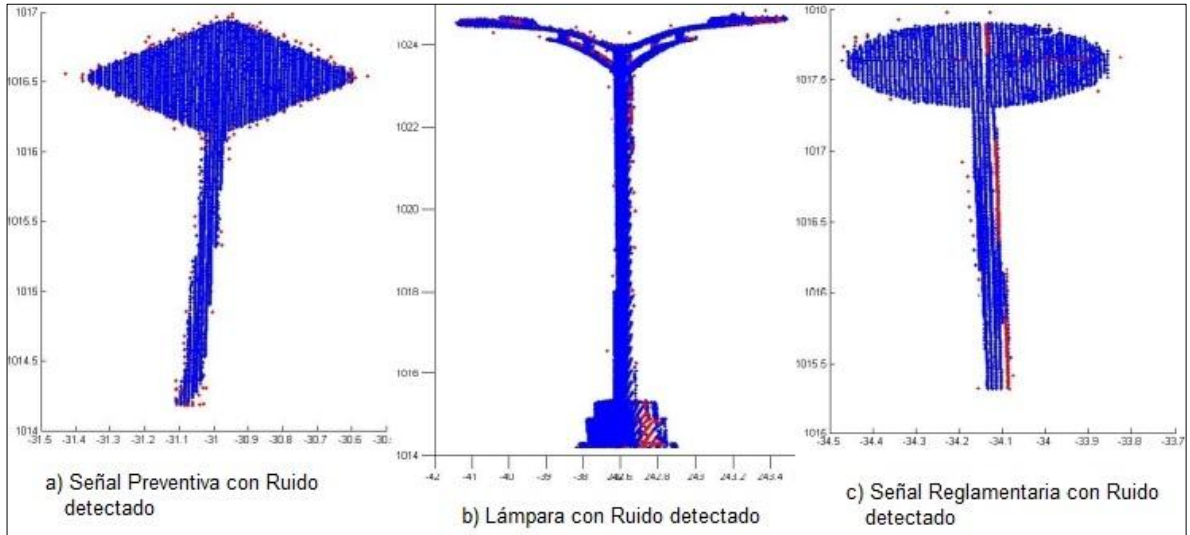
- Basados en [95] se calculó la estimación de la densidad de los vecinos más cercanos de cada punto mediante la fórmula:

$$\rho = \frac{k}{N \cdot V(x)} \quad (5.6.18)$$

- Luego se calculó la media y la desviación estándar de todos los valores de las densidades calculadas anteriormente, con el fin de establecer la densidad promedio y su desviación.
- Luego, se compararon las densidades de cada punto con respecto a la densidad promedio y se descartaron aquellos puntos que se encontraban por fuera del rango $\mu \pm \alpha \cdot \sigma$. Para el caso de este proyecto se estableció $\alpha = 0.6$ que se encontró con base a experimentos de prueba y error.

En la Figura 72 se visualiza el filtrado del ruido, donde los puntos que tienen color rojo son aquellos que el algoritmo reconoció como ruido.

Figura 72. Segmentos Lineales con Ruido detectado

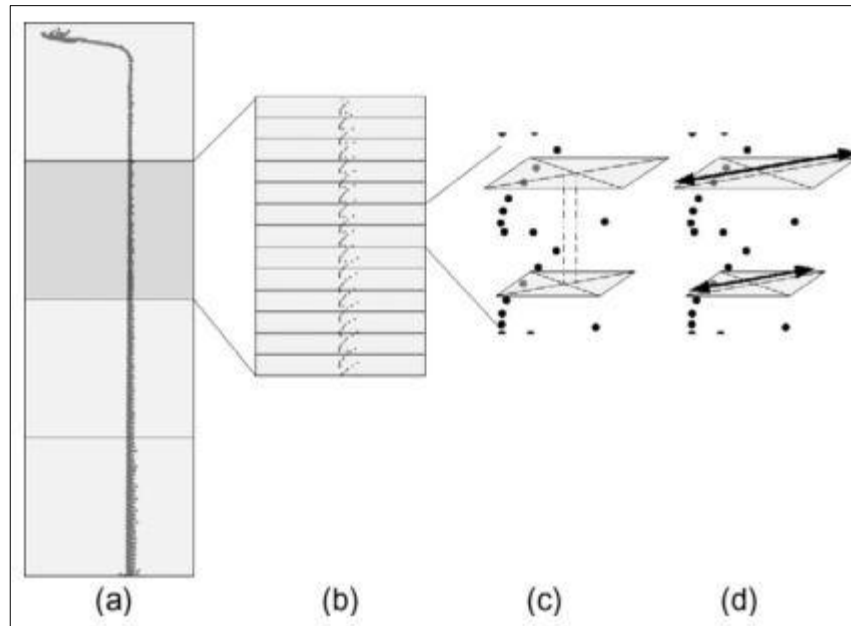


Fuente: Elaboración propia

5.6.5 Segmentación basada en la identificación de postes. Una vez realizado el filtrado del ruido en los segmentos alargados, se procedió a identificar cuáles de ellos estaban conformados por un poste. La característica particular de estos elementos se pueden describir como una estructura vertical con diámetro o diagonal uniforme y que está rodeada de espacio vacío [31], [39], [35]. Algunos segmentos que pueden contener algún tipo de poste son: lámparas, semáforos, troncos de árboles, postes en forma de ángulo donde las señales de tránsito están atornilladas, bolardos, luminarias, entre otros.

5.6.5.1 Fundamentos. Para llevar a cabo el reconocimiento de postes, se tomó como referencia el trabajo presentado en [39], el cual implementaron una técnica basada en percentiles, en donde, en vez de analizar el segmento en su totalidad, hicieron una partición del segmento en percentiles con los valores de la altura (coordenada Z), ver Figura 73.

Figura 73. Principio de percentiles para el reconocimiento de postes



Fuente: Recognizing basic structures from mobile laser scanning data for road inventory studies - Shi Pu, George Vosselman

En este trabajo dividieron el segmento en cuartiles, en donde seleccionaron el tercer cuartil para llevar a cabo el análisis, debido a que en algunos casos, en los dos primeros cuartiles puede haber objetos ubicados junto al poste (arbusto, canecas o bolsas de aseo) que impiden analizar las dimensiones reales del mismo.

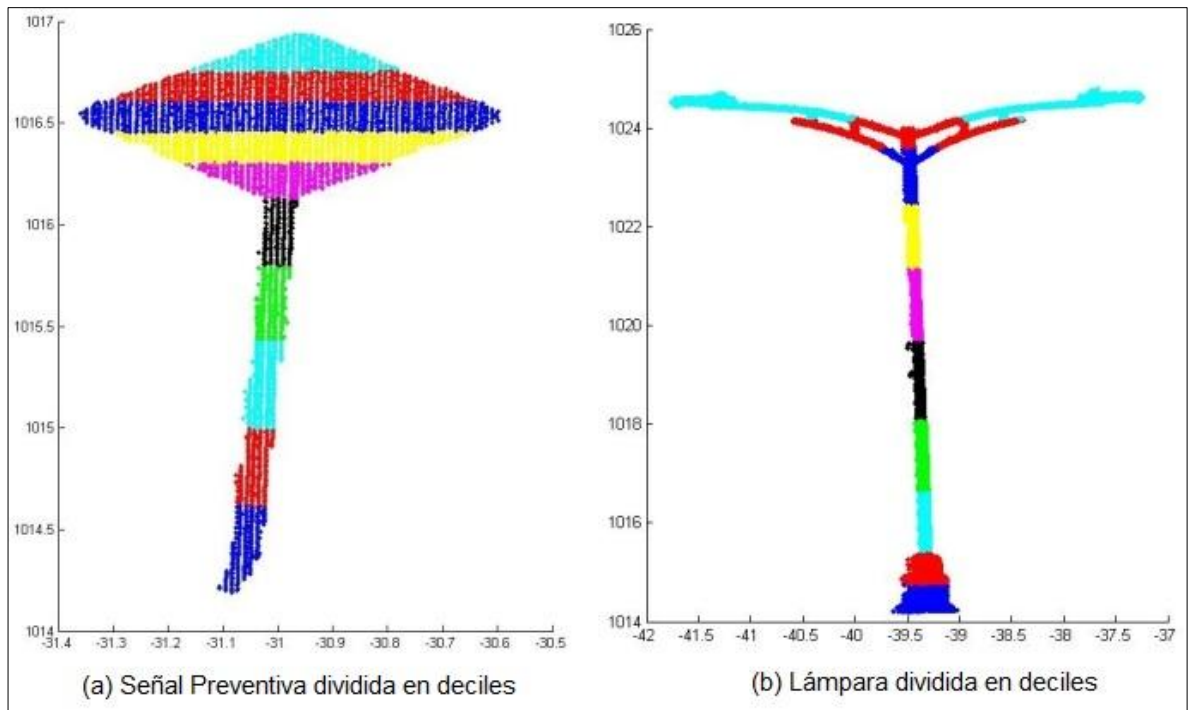
Luego el cuartil seleccionado es dividido por planos horizontales, y en cada uno de ellos se proyectan los puntos que se encuentran en la parte superior, para luego ajustarles un rectángulo envolvente. Después se calcula el centro y la diagonal de cada rectángulo envolvente y se extrae la media μ y la desviación estándar σ de todas las diagonales. Con estos valores se establece la diagonal máxima $\mu + \sigma$ que debe contener todo el poste. Los valores de las diagonales del resto de los cuartiles son comparados con la diagonal máxima definida anteriormente y

aquellos cuartiles que sobrepasen este valor son descartados como elemento poste.

5.6.5.2 Implementación. Para llevar a cabo el reconocimiento de postes dentro de los segmentos lineales se desarrolló el algoritmo de la siguiente manera:

- Se dividió cada segmento en deciles (división de los datos ordenados en diez partes iguales) con base en sus valores de altura, que en este caso corresponde a la coordenada Z de los puntos que conforman el segmento, ver Figura 74.
- Se seleccionó el tercer decil (primer color cian de abajo hacia arriba) como punto de partida para el análisis. En caso de que en este decil no se logre definir una diagonal estándar, se selecciona el decil de abajo (color rojo), es decir, el segundo decil. Si tampoco se encuentra una diagonal estándar, entonces se selecciona el decil de arriba, o sea el cuarto decil (color verde).
- Si en ninguno de los tres deciles es posible determinar una diagonal, entonces el segmento es descartado como candidato a ser una señal de tránsito. En el caso contrario, se van etiquetando como poste aquellos deciles que no sobrepasen el valor establecido de la diagonal estándar.

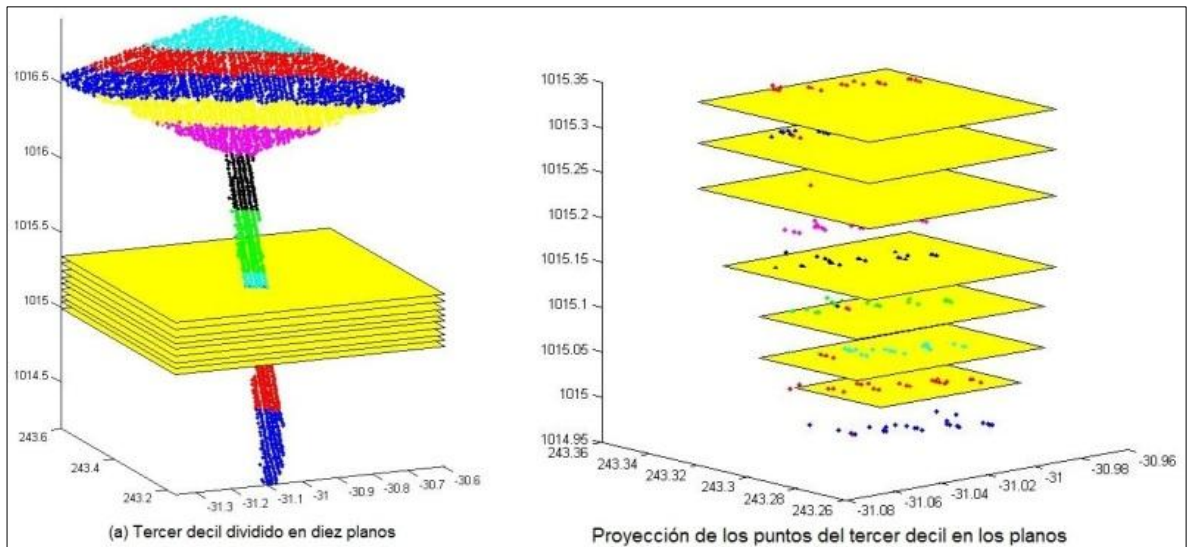
Figura 74. División de Segmentos Lineales en Deciles



Fuente: Elaboración propia

- Para hacer el análisis dentro de cada decil, éste fue dividido por diez planos horizontales, en donde a cada plano se le proyectaron los puntos que se encontraban por encima de él y por debajo del plano siguiente, ver Figura 75.

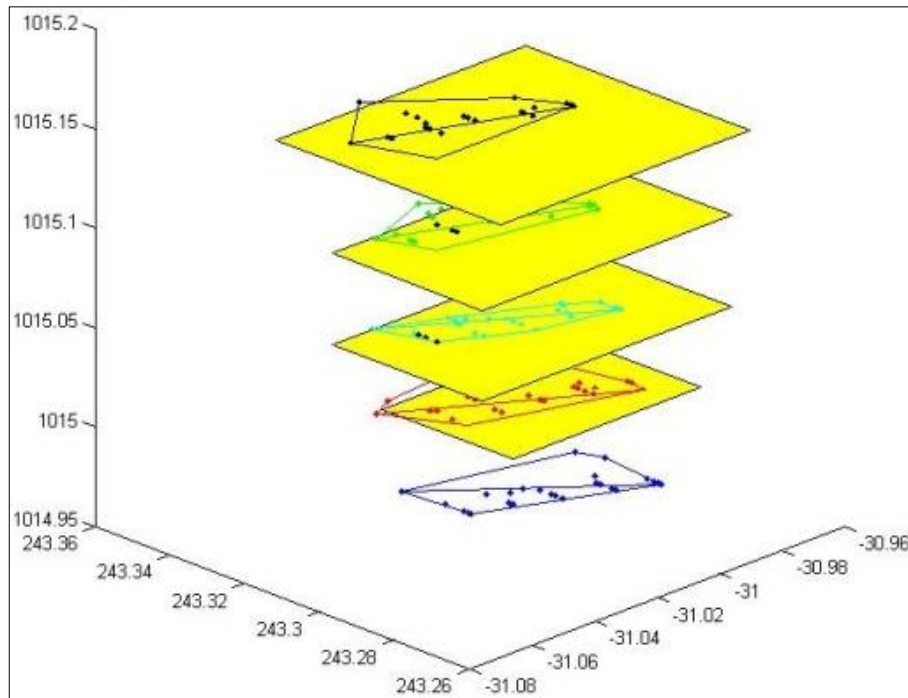
Figura 75. Puntos del tercer decil proyectados sobre los diez planos que lo dividen



Fuente: Elaboración propia

- Después de la proyección de los puntos en su plano correspondiente, se les ajustó una envolvente convexa con el fin de calcular su diagonal, ver Figura 76. Luego, se calculó la media μ y la desviación estándar σ de todas las diagonales de las diez envolventes convexas para definir la diagonal estándar $\mu + \sigma$. Si $\sigma > 1$ entonces este decil se descarta como parte de un poste y se intenta con el decil siguiente en el orden que se mencionó anteriormente.

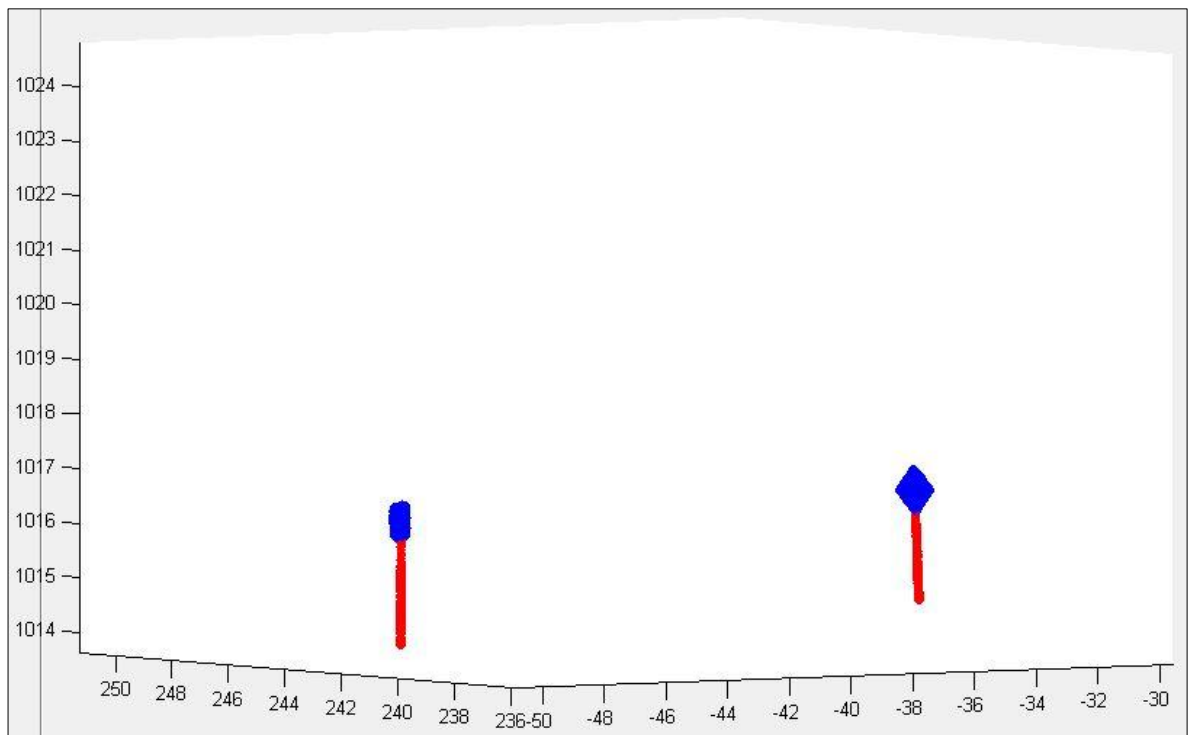
Figura 76. Envoltura convexa y cálculo de la diagonal de los puntos proyectados sobre los planos



Fuente: Elaboración propia

Un ejemplo del resultado de la identificación de los segmentos con poste se visualiza en la Figura 77, donde la parte de color rojo del segmento es el elemento poste. Los resultados de la segmentación basada en la identificación de postes de cada una de las secciones se representan en la Tabla 15.

Figura 77. . Resultado de la segmentación basada en la identificación de postes de la Sección 8



Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Resultados de la Segmentación basada en la identificación de postes de las secciones de la nube de puntos

Sección	No. de Segmentos	No. de Segmentos con Pole
Sección 1	7	3
Sección 2	13	2
Sección 5	14	5
Sección 8	15	2
Sección 10	12	6
Sección 11	8	3
Sección 15	7	2
Sección 17	7	1
Sección 20_1	14	1
Sección 20_2	10	5
Sección 25_1	18	4
Sección 25_2	19	4

Sección	No. de Segmentos	No. de Segmentos con Pole
Sección 33_1	13	6
Sección 33_2	18	6

5.6.6 Segmentación basada en la detección de superficies planas mediante el

método de RANSAC. La geometría de los objetos hechos por el hombre en su mayoría tiene formas muy definidas como planos, cilindros y esferas. Estos tipos de geometrías también se encuentran presentes en las nubes de puntos, por esta razón, se han desarrollado varios métodos para el reconocimiento de estas formas. En particular, los planos son el tipo de forma geométrica más frecuente en los objetos hechos por el hombre y uno de los métodos más comunes para el reconocimiento de estas superficies planas, se basan fundamentalmente en la selección de un conjunto pequeño de puntos que se ajustan bien a un plano denominado *conjunto semilla*. Luego, se van añadiendo a este conjunto aquellos puntos que cumplen con una condición establecida como por ejemplo: un umbral de distancia al conjunto o un criterio de planicidad similar al conjunto. Este procedimiento se lleva a cabo de manera similar como los algoritmos de crecimiento de regiones ampliamente conocidos en la segmentación de imágenes.

Los métodos más comunes para el reconocimiento de superficies planas en nubes de puntos 3D son la Transformada de Hough 3D y el RANSAC (*del inglés Random Sample Consensus*), la desventaja del primer método es que tiene un alto costo computacional debido a que los puntos se deben transformar en otro espacio de parámetros llamado *Espacio de Hough* y luego por cada uno de ellos se genera una matriz de votación donde se almacena las comparaciones de ese punto con cada uno de los parámetros del plano [96]. Por lo tanto, para este proyecto se escogió el método de RANSAC, por ser más robusto en presencia de ruido y más rápido que el de la Transformada de Hough.

5.6.6.1 Fundamentos. El método de RANSAC fue introducido por Fischler [97], para el ajuste robusto de un modelo paramétrico a un conjunto de datos que pueden contener un alto grado de ruido o valores atípicos. Este algoritmo genera varias hipótesis de formas geométricas mediante la selección aleatoria de un subconjunto de puntos de muestra, con los cuales intenta determinar de forma única los parámetros de alguna primitiva geométrica [51], .

Para la detección de planos, se selecciona de forma aleatoria tres puntos para estimar los parámetros del plano candidato. Luego, los puntos restantes son comparados con este plano mediante alguna condición establecida, como por ejemplo, un umbral de distancia al plano. Si la cantidad de puntos que cumplen con la condición es más grande que la cantidad definida por el usuario, entonces el plano candidato es considerado como plano detectado. En caso contrario, el procedimiento anterior es repetido la cantidad de veces definida por el usuario, almacenando los parámetros del plano candidato junto con su cantidad de puntos detectados. El plano candidato con mayor puntaje es considerado como plano detectado, de lo contrario, es reportado como superficie no plana.

5.6.6.2 Implementación. Una vez que se identificaron los puntos que pertenecían al poste, éstos se eliminaron del segmento alargado quedando solamente aquellos puntos que no hacían parte del poste, para luego ser analizados con el algoritmo de RANSAC y detectar si existe alguna superficie plana en ellos. Aquellos segmentos en donde se logró identificar que los puntos se ajustaban a una superficie plana, fueron etiquetados como posibles candidatos a ser señales de tránsito.

La implementación del algoritmo de RANSAC para la detección de superficies planas en los segmentos, se llevó a cabo de la siguiente manera:

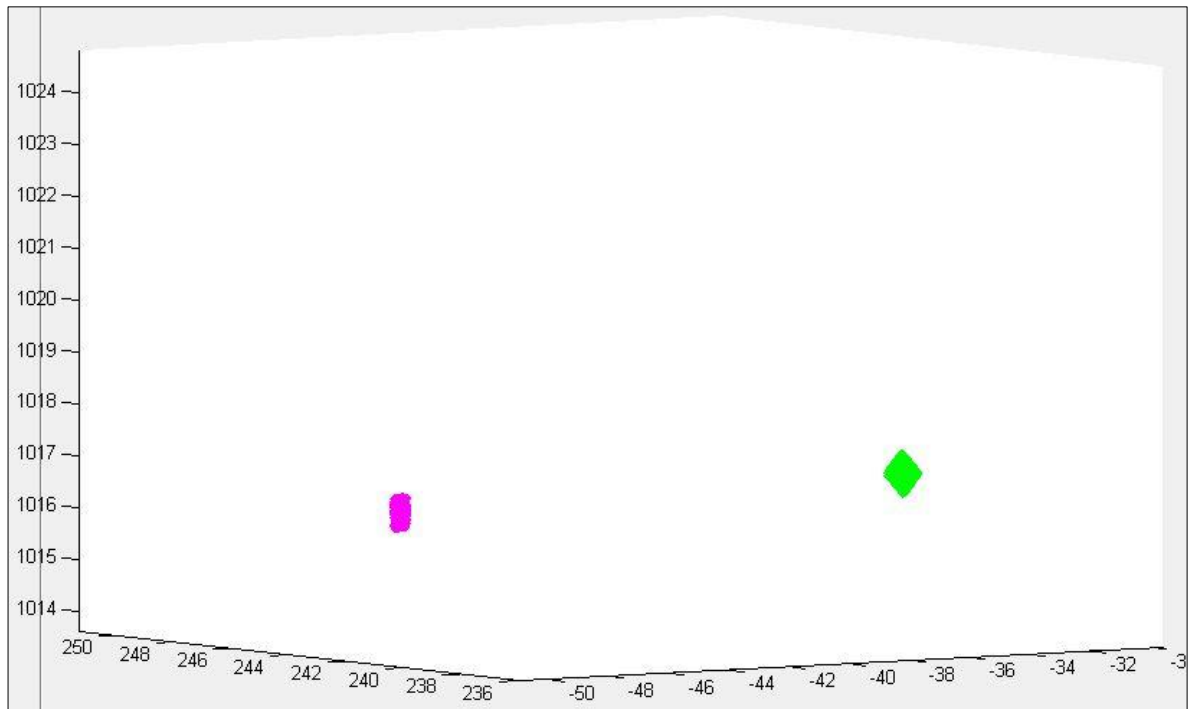
- Se establecieron los valores de los parámetros del algoritmo como: la cantidad de puntos para el subconjunto de prueba, el número máximo de iteraciones, el

umbral de distancia y la cantidad mínima de puntos para que el segmento sea considerado una superficie plana. Estos valores fueron obtenidos por medio de la experimentación.

- Se seleccionó aleatoriamente el subconjunto de puntos de prueba y mediante el análisis de eigenvalores se calculó las normales de estos puntos. Si estos valores eran similares entre sí, se podían ajustar más fácilmente a un plano.
- Con base en el umbral de distancia definido por el usuario, se compararon cada uno de los puntos restantes con el plano estimado anteriormente y aquellos que cumplían con esta condición, eran etiquetados como pertenecientes a este plano.
- Si la cantidad de puntos etiquetados junto con los puntos de la muestra superaban el umbral establecido de cantidad mínima de puntos, entonces, el segmento era identificado como una superficie plana.
- En caso contrario, se almacena el valor de la cantidad de puntos y se regresa nuevamente al segundo paso. Los resultados son comparados con el resultado inmediatamente anterior, hasta que alguno de ellos cumpla con las condiciones predefinidas o hasta que se agote el número de iteraciones. Si en ninguna muestra se logra reconocer una superficie plana, entonces el segmento es descartado como candidato a ser una señal de tránsito.

Un ejemplo del resultado de la identificación de los segmentos conformados por superficies planas se visualiza en la Figura 78 .Los resultados de la segmentación de las superficies planas basadas en el método RANSAC en las secciones de la nube de puntos se presentan en la Tabla 16.

Figura 78. Resultado de la segmentación basada en la detección de superficies planas de la Sección 8



Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Resultados de la Segmentación basada en la detección de Superficies Planas de las secciones de la nube de puntos

Sección	No. de segmentos	No. de segmentos con superficies planas
Sección 1	7	1
Sección 2	13	1
Sección 5	14	1
Sección 8	15	2
Sección 10	12	1
Sección 11	8	3
Sección 15	7	2
Sección 17	7	1
Sección 20_1	14	1
Sección 20_2	10	4
Sección 25_1	18	4

Sección	No. de segmentos	No. de segmentos con superficies planas
Sección 25_2	19	2
Sección 33_1	13	3
Sección 33_2	18	1

5.7. DESCRIPCIÓN

El proceso de segmentación descrito en la sección anterior, generó como resultado una serie de segmentos de nubes de puntos sin ruido, sin poste y con una forma geométrica definida, que para este caso se seleccionaron aquellas que representaban una superficie plana. El objetivo de esta etapa es encontrar las características adecuadas para identificar las señales de tránsito.

Con base en los trabajos publicados en [38], [39], los cuales presentaron una serie de descriptores característicos basados en el enfoque geométrico para el reconocimiento de elementos urbanos. El conjunto de estas características permiten diferenciar los elementos entre sí, dentro de las cuales se destacan: el tamaño, la posición, la orientación, la forma, el color, el material, entre otros.

Para el caso de estudio de este proyecto se detectaron cinco tipos de formas geométricas diferentes de las señales de tránsito de la ciudad de Bucaramanga, las cuales son:

- El rombo que representa la geometría las señales preventivas.
- El rectángulo que es la forma geométrica de las señales informativas.
- El círculo que describe la forma general de las señales reglamentarias.
- El octágono regular que es la forma geométrica de la señal de pare.
- El triángulo equilátero que es la forma geométrica de la señal de ceda el paso.

Los valores de las características geométricas usadas para el reconocimiento de las diferentes señales de tránsito fueron extraídos de [87], que es la norma vigente a nivel nacional para el diseño y construcción de las señales de tránsito en Colombia.

Cada señal de tránsito puede ser medida de acuerdo con sus características geométricas, los descriptores seleccionados fueron:

5.7.1 Área. El área de las señales de tránsito depende de la forma geométrica que ésta tenga. La fórmula matemática de cada una de las formas geométricas es:

- **El rombo:** Esta forma geométrica prácticamente es un cuadrado con una rotación de 45° grados sobre su eje central y su fórmula matemática es:

$$A = l^2 \quad (5.7.1)$$

- **El rectángulo:** la fórmula para calcular el área del rectángulo es:

$$A = l \cdot l \quad (5.7.2)$$

- **El círculo:** la fórmula matemática para calcular el área del círculo es:

$$A = \pi \cdot r^2 \quad (5.7.3)$$

- **El octágono regular:** su fórmula matemática para calcular el área con base en el valor de su lado l es:

$$A = 1 + \sqrt{2} \cdot l \quad (5.7.4)$$

- **El triángulo equilátero:** la fórmula para el cálculo del área con base en el valor de su lado l es:

$$A = \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot l^2 \quad (5.7.5)$$

Los valores de las áreas de cada una de las formas geométricas se encuentran representados en la Tabla 17.

5.7.2 Lados. El valor de los lados varía de acuerdo con el tipo de forma geométrica y también están representados en la Tabla 17.

5.7.3 Ángulos. La medida de los ángulos que conforman cada una de las formas geométricas y la sumatoria de éstos se representan en la Tabla 17.

Tabla 17. Dimensiones de las características geométricas de las señales de tránsito

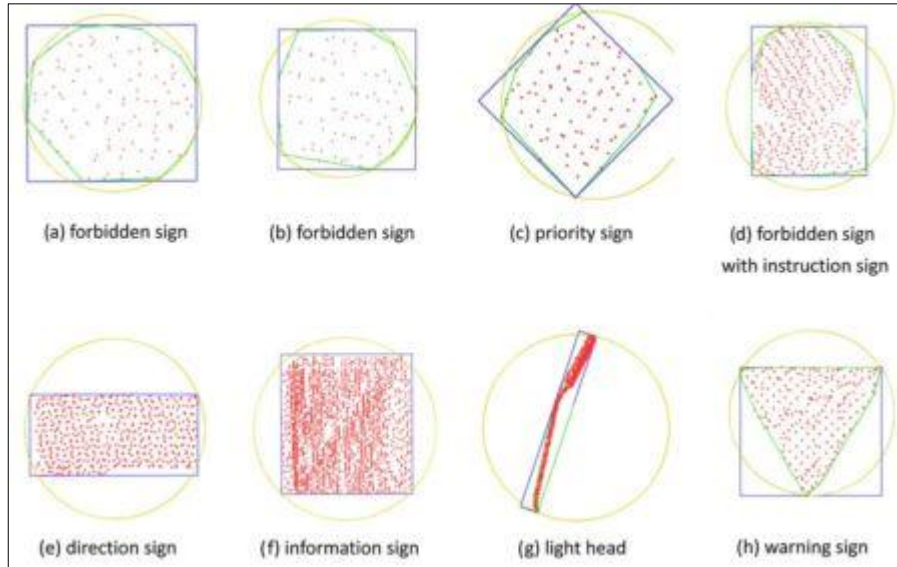
	Área (m)	Lados (m)	Ángulos (m)	Σ Ángulos (m)
Rombo	0.36	0.6 (4)	90° (4)	360°
Rectángulo	0.3	0.5 (2) 0.6 (2)	90° (4)	360°
Circulo	0.2827	-	-	180° ángulos opuestos del cuadrilátero cíclico inscrito
Octágono Regular	0.2979	0.2484 (8)	135° (8)	1080°
Triángulo Equilátero	0.2436	0.75 (3)	60° (3)	180°

5.8. INTERPRETACIÓN Y CLASIFICACIÓN

5.8.1 Fundamentos. Para llevar a cabo la fase inicial del proceso de clasificación se basó en el trabajo presentado en [39], el cual llevan a cabo los siguientes pasos:

- **Ajuste geométrico:** que consiste en la generación de una envolvente convexa con los puntos que se encuentran alrededor del segmento seleccionado, para hacer el cálculo de su área. Luego, al segmento también se le ajusta un Rectángulo Mínimo Envolvente (*MBR del inglés Minimum Bounding Rectangle*) y un Círculo Mínimo Envolvente (*MBC del inglés Minimum Bounding Circle*).
- **Reconocimiento del rectángulo o círculo:** las áreas de la envolvente convexa, el MBR y el MBC son calculadas para luego ser comparadas. Si el área del MBR o MBC tiene un porcentaje de similitud de más del 80% con respecto al área de la envolvente convexa, entonces el segmento es clasificado en la forma geométrica de mayor coincidencia (cuadrado o círculo). En el caso de que las dos áreas (MBR y MBC) se encuentran por encima de este porcentaje, entonces se escoge la que tiene mayor porcentaje de similitud, ver Figura 79.
- **Reconocimiento del triángulo:** para aquellos segmentos que se encontraban por debajo del porcentaje de similitud con respecto al área del envolvente convexa, se hizo otro tipo de comparación con la forma geométrica del triángulo basados en el método de Momentos de Hu, ver Figura 79.

Figura 79. Clasificación de los diferentes tipos de señales de tránsito en Europa



Fuente: Recognizing basic structures from mobile laser scanning data for road inventory studies – Shi Pu & George Vosselman

Finalmente, los autores aclaran que aún no han implementado una solución para aquellas formas geométricas compuestas como se ven en la Figura 79d. Los resultados del método propuesto en este trabajo están representados en la Figura 80, donde se visualizan los porcentajes de figuras geométricas detectadas por el algoritmo.

Figura 80. Resultados de la clasificación de las señales de tránsito en [39]

	a	b	c	d	e	f	g	h
Rectangle	79%	82%	89%	76%	92%	96%	22%	57%
Circle	84%	81%	59%	54%	49%	67%	5%	48%
Triangle				25%			2%	93%

Fuente: Recognizing basic structures from mobile laser scanning data for road inventory studies – Shi Pu & George Vosselman

5.8.2 Implementación. El primer paso hacia la clasificación de los segmentos en señales de tránsito, se inició con la transformación geométrica de cada segmento para pasarlo de su sistema de coordenadas en 3D a uno en 2D. Este cambio de coordenadas se realizó para proyectar el segmento sobre el plano XY y ajustarle una envolvente convexa, de tal manera que, el análisis de cada segmento se realizó a través de las dimensiones del polígono generado por su envolvente.

Además de la envolvente convexa, a cada segmento también se les ajustó un *MBR*, un *MBC*, un octágono mínimo envolvente (*MBO del inglés Minimum Bounding Octagon*) y un triángulo mínimo envolvente (*MBT del inglés Minimum Bounding Triangle*), con el fin de comparar cada una de estas áreas con el área de su envolvente convexa y seleccionar aquella que tenga mayor porcentaje de similitud. Para los resultados de este proyecto se estableció un umbral de similitud por encima del 85% con base en los experimentos que se hicieron sobre todas las secciones de la nube de puntos. En caso de que existan varias formas geométricas cuyas áreas se encuentre por encima de este umbral, entonces se selecciona aquel polígono que tenga el mayor porcentaje de similitud con respecto a la envolvente convexa.

Finalmente, con base en los descriptores de las formas geométricas mostradas en la Tabla 17, se estableció un conjunto de reglas para la caracterización de las señales de tránsito, que son la base para que el modelo pueda reconocer el tipo de señal.

5.8.2.1 Transformación geométrica

Fundamentos

La transformación geométrica es el cambio en la posición, tamaño o forma de una figura, que mediante operaciones geométricas a cada punto del plano le hace corresponder otro punto, de tal manera que se genera otra figura. Las

transformaciones geométricas más comunes son: la traslación, la rotación y el escalamiento.

- **Traslación:** este tipo de movimiento permite desplazar la figura a lo largo de sus dimensiones hacia una nueva posición manteniendo su forma y tamaño. Para cada punto $p(x, y, z)$ que se moverá d_x unidades en el eje X , d_y unidades en el eje Y , y d_z unidades en el eje Z , generará un nuevo punto $p'(x', y', z')$ cuyas coordenadas se obtienen de la siguiente manera:

$$x' = x + d_x, \quad y' = y + d_y, \quad z' = z + d_z \quad (5.8.1)$$

Por lo tanto, con cada una de las distancias se puede generar la *matriz de traslación* T_{d_x, d_y, d_z} :

$$T_{d_x, d_y, d_z} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.8.2)$$

Entonces, para calcular la traslación del punto $p(x, y, z)$ al punto $p'(x', y', z')$ se aplica la matriz de la siguiente manera:

$$x', y', z', 1 = x, y, z, 1 * \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.8.3)$$

- **Escalamiento:** este tipo de transformación permite cambiar el tamaño de la figura expandiéndola o estrechándola en sus dimensiones, donde cada punto es transformado por la multiplicación de tres factores de escalamiento s_1, s_2, s_3 a lo largo de los ejes X, Y y Z respectivamente, de tal manera que, las coordenadas del nuevo punto $p'(x', y', z')$ se obtienen así:

$$x' = x \cdot s_1, \quad y' = y \cdot s_2, \quad z' = z \cdot s_3 \quad (5.8.4)$$

La *matriz de escalamiento* queda definida de la siguiente manera:

$$S_{s_1, s_2, s_3} = \begin{pmatrix} s_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.8.5)$$

Entonces, el escalamiento de un punto p en 3D se puede expresar como el producto matricial:

$$x', y', z', 1 = x, y, z, 1 * \begin{pmatrix} s_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.8.6)$$

- **Rotación:** esta transformación permite girar una figura sobre un eje de rotación, dado un valor de ángulo de rotación θ y su dirección. La rotación en 3D se lleva a cabo alrededor de alguno de los tres ejes de coordenadas.

Rotación alrededor del eje X, la rotación de cada punto $p(x, y, z)$ dado un ángulo θ , alrededor del eje X da como resultado un nuevo punto $p'(x', y', z')$ que se obtiene:

Entonces se genera la matriz de rotación alrededor del eje X así:

$$\begin{aligned} x' &= x \\ y' &= y \cdot \cos\theta - z \cdot \text{sen}\theta \\ z' &= y \cdot \text{sen}\theta + z \cdot \cos\theta \end{aligned} \quad R_x(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\text{sen}\theta & 0 \\ 0 & \text{sen}\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.8.7)$$

Por lo tanto, la rotación de un punto p en 3D alrededor del eje X se puede expresar como el producto:

$$x', y', z', 1 = x, y, z, 1 * \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\text{sen}\theta & 0 \\ 0 & \text{sen}\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} \quad (5.8.8)$$

Rotación alrededor del eje Y, la rotación de cada punto $p(x, y, z)$ dado un ángulo θ , alrededor del eje Y da como resultado un nuevo punto $p'(x', y', z')$ que se obtiene:

Se genera la matriz de rotación alrededor del eje Y

$$\begin{aligned} x' &= x \cdot \cos\theta + z \cdot \text{sen}\theta \\ y' &= y \\ z' &= -x \cdot \text{sen}\theta + z \cdot \cos\theta \end{aligned} \quad R_y(\theta) = \begin{matrix} \cos\theta & 0 & \text{sen}\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\text{sen}\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} \quad (5.8.9)$$

Por lo tanto, la rotación de un punto p en 3D alrededor del eje Y se puede expresar como el producto:

$$x', y', z', 1 = x, y, z, 1 * \begin{matrix} \cos\theta & 0 & \text{sen}\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\text{sen}\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} \quad (5.8.10)$$

Rotación alrededor del eje Z, la rotación de cada punto $p(x, y, z)$ dado un ángulo θ , alrededor del eje Z da como resultado un nuevo punto $p'(x', y', z')$ que se obtiene:

Se genera la matriz de rotación alrededor del eje Z

$$\begin{aligned} x' &= x \cdot \cos\theta - y \cdot \text{sen}\theta \\ y' &= x \cdot \text{sen}\theta + y \cdot \cos\theta \\ z' &= z \end{aligned} \quad R_z(\theta) = \begin{matrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta & 0 & 0 \\ \text{sen}\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} \quad (5.8.11)$$

Por lo tanto, la rotación de un punto p en 3D alrededor del eje Z se puede expresar como el producto:

$$x', y', z', 1 = x, y, z, 1 * \begin{pmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta & 0 & 0 \\ \text{sen}\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.8.12)$$

El algoritmo utilizado para la transformación geométrica de un sistema de coordenadas de 3D a uno de 2D para el segmento seleccionado consta de los siguientes pasos:

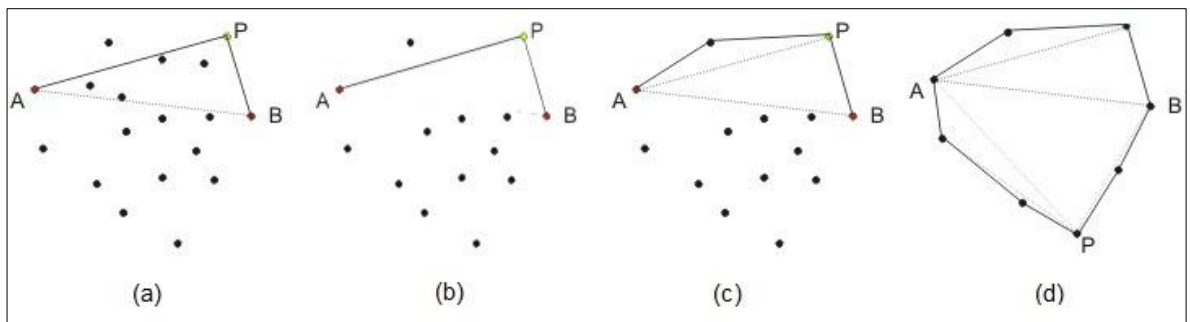
- Se aplica la transformación geométrica de traslación del segmento al punto de origen del sistema de coordenadas (0, 0,0).
- Con las dimensiones más importantes del segmento se hace la proyección a uno de los planos conformados por estas dimensiones.

5.8.2.2 Envolverte Convexa. Después de que cada segmento ha sido proyectado a un plano en el sistema de coordenadas 2D, se le ajusta una envolvente convexa que consiste en encontrar el conjunto mínimo de puntos del borde con los cuales se puede construir el polígono más pequeño que contenga a todos los puntos de dicho segmento. El algoritmo fue implementado de la siguiente manera:

- Se traza una línea que une el punto que se encuentra más a la izquierda con el punto que se encuentra más a la derecha del segmento, como se observa en la Figura 81a con la recta que une los puntos A y B , entonces el segmento queda dividido en dos subconjuntos de puntos.
- En cada uno de los subconjuntos se llevan a cabo los siguientes pasos de forma recursiva:
 - Se busca el punto que se encuentre más lejano de la recta AB que en la Figura 81a se le denomina punto P y luego se une este punto con la recta AB .

- Los puntos que quedan dentro del triángulo formado por los puntos A , B y P son eliminados, como se muestra en la Figura 81b.
- De nuevo se forman otros dos subconjuntos de puntos, el que queda por encima de la recta AP y el que queda por encima de la recta PB .
- Se reemplaza la recta original AB con las rectas AP y PB , y de nuevo se ejecuta el algoritmo a partir del paso 2 en los dos subconjuntos, ver Figura 81c.
- El algoritmo se detiene cuando después de la división un subconjunto queda vacío o tiene un solo punto, como se visualiza en Figura 81d.

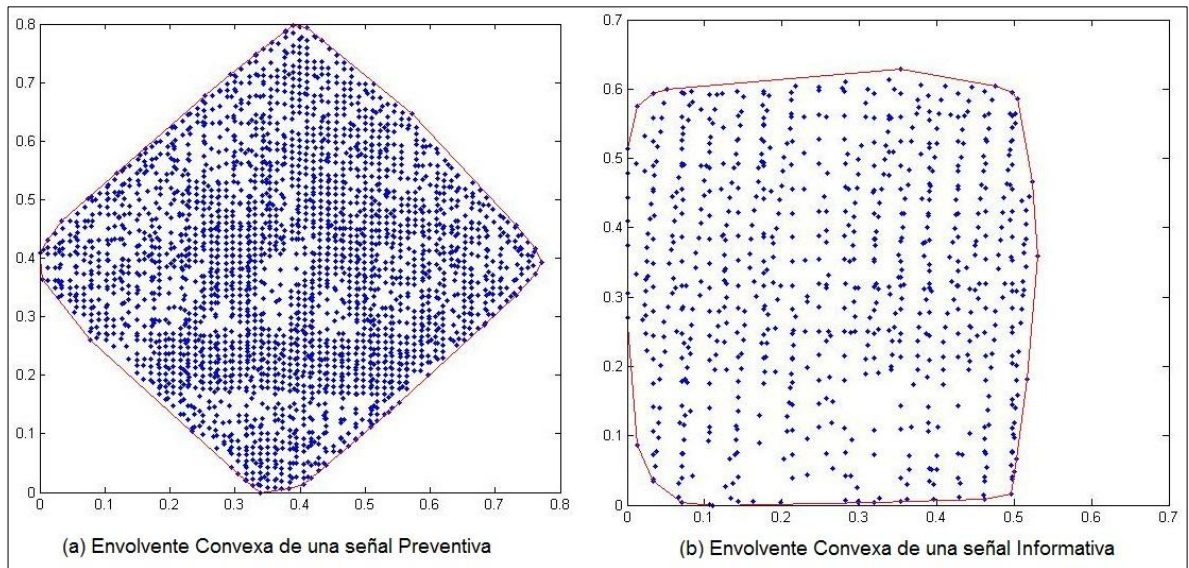
Figura 81. Pasos para la generación del Envoltente Convexa (*ConvexHull*)



Fuente: Elaboración propia

Un ejemplo del resultado del ajuste de la envolvente convexa sobre los segmentos de la Sección 8 de la nube de puntos es visualizado en la Figura 82.

Figura 82. Resultado del ajuste de una Envolvente Convexa a los segmentos identificados con superficies planas de la Sección 8



Fuente: Elaboración propia

5.8.2.3 MBR, MBC, MBO y MBT. De igual manera como se ajustó la envolvente convexa a cada segmento, también realizó el ajuste de los siguientes polígonos regulares conocidos como el MBR, el MBC, MBO (*Minimum Bounding Octagon*) y MBT (*Minimum Bounding Triangle*) llamados envolventes geométricas, con el fin de comparar las áreas de estos polígonos con el área de la envolvente convexa.

Los pasos del algoritmo para la generación del MBR fueron:

- Se ingresa como parámetro de entrada los vértices que conforman la envolvente convexa de cada segmento, para que un borde del MBR calculado coincida con alguno de los bordes de la envolvente convexa.
- Se calcula la longitud de los lados de la envolvente convexa y los ángulos que la conforman.
- Se realiza una transformación geométrica de rotación en el primer cuadrante a la envolvente convexa.

- Calcula el tamaño del borde y el área del rectángulo delimitante para todos sus posibles bordes.
- Encuentra el área mínima para luego calcular los vértices del rectángulo delimitante que representan los vértices del MBR.

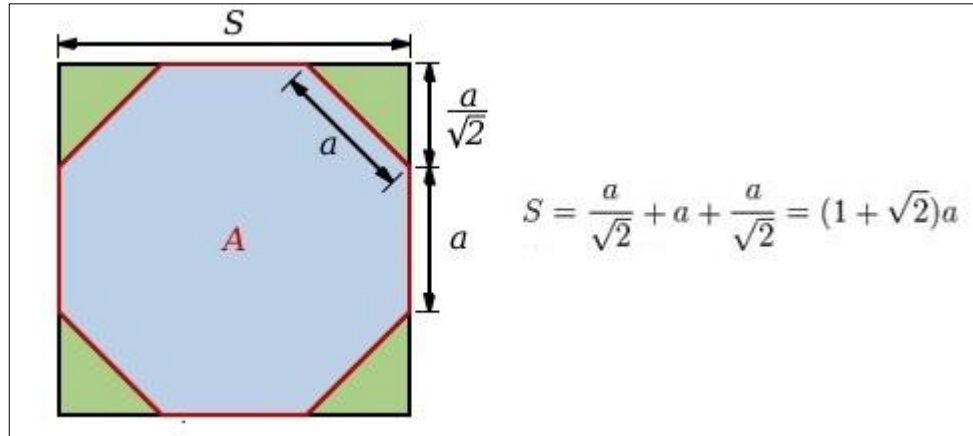
Los pasos que se implementaron para la generación del MBC fueron:

- Se ingresa como parámetros los vértices que conforman la envolvente convexa.
- De manera recursiva se llevan a cabo los siguientes pasos:
 - Se halla el centroide de la envolvente convexa mediante la diferencia entre sus puntos extremos, luego se calcula el radio a través de la distancia euclidiana entre el centroide y los puntos extremos.
 - Se compara la distancia de cada uno de los puntos con el valor del radio, aquellos puntos cuya distancia sea mayor se utilizan para reajustar el valor del radio y son etiquetados como vértices del MBC.

Los pasos que se siguieron para la generación del MBO fueron:

- Se ingresa como parámetros los vértices del MBR, porque la construcción de un octágono parte de la base de un cuadrado, además, de esta manera se hace coincidir un lado del octágono con algún lado de la envolvente convexa.
- Un octágono es una figura cerrada que contiene ocho lados iguales y cada uno de los ángulos internos es de 135° cuya suma total es de 1.080° .
- La relación que existe entre el lado de un octágono regular a con el lado de un rectángulo s es $a = \frac{s}{(1 + \sqrt{2})}$, ver Figura 83. Para para calcular un lado del octágono regular se identifica primero el centro de un lado del MBR y a partir de ese centro se suma a ambos lados el valor de $\frac{a}{2}$, de esta manera se encuentran los vértices del octágono en ese lado. Este procedimiento se realiza para los demás lados del MBR.

Figura 83. Cálculo de los lados del octágono a partir de los lados de un cuadrado.



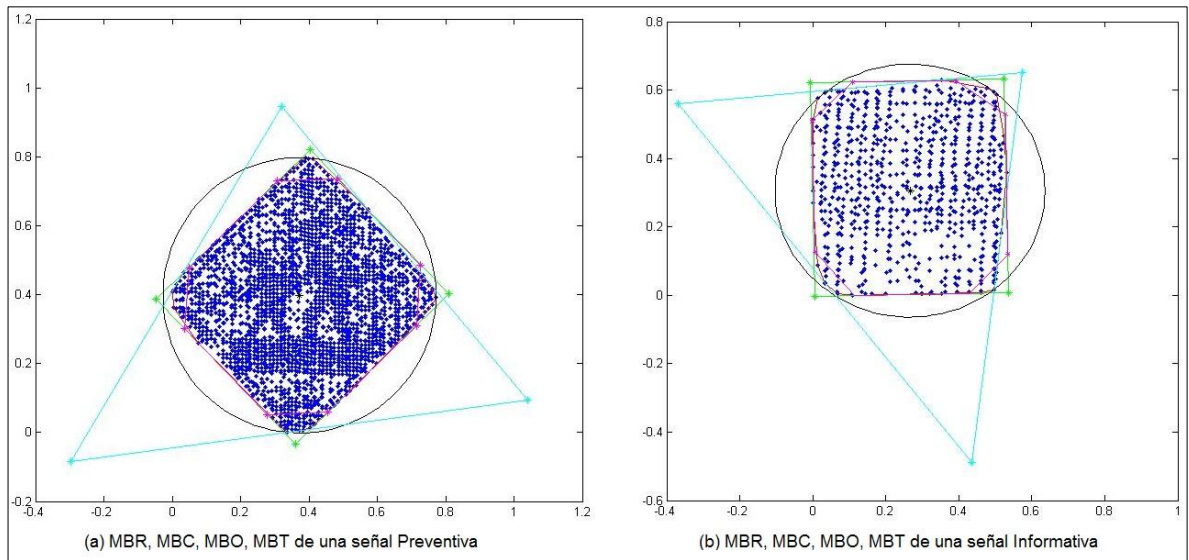
Fuente: Elaboración propia

Los pasos que se implementaron para la generación del MBT fueron:

- Un triángulo equilátero es el que tiene sus tres lados iguales y sus tres ángulos internos son de 60° para un total de 180° .
- Se ingresan como parámetros de entrada los vértices que conforman la envolvente convexa.
- Con los vértices ingresados genera su envolvente convexa y calcula los ángulos con cada uno de los bordes de la envolvente.
- Por cada borde se aplica una matriz de rotación para calcular el punto con el cual se minimiza el área del triángulo.

Los resultados del ajuste de las cuatro formas geométricas en los segmentos identificados con superficies planas de la Sección 8, se visualizan en Figura 84, donde el MBR está en color verde, el MBC está en color negro, el MBO está en color magenta y el MBT en color cian.

Figura 84. Resultado del ajuste de un MBR, MBC, MBO y MBT a los segmentos identificados con superficies planas de la Sección 8



Fuente: Elaboración propia

5.8.2.4 Clasificación. Con el propósito de lograr un sistema de clasificación para las señales de tránsito presentes en cada una de las secciones de la nube de puntos, se tomó como referencia el trabajo presentado en [39], cuyo enfoque se basó en la forma bien definida que tienen las señales de tránsito desde el punto de vista de sus características geométricas, tales como: el área, la longitud de sus lados y el valor de sus ángulos.

Para deducir el tipo de señal de tránsito al que pertenece el segmento que está siendo evaluado, se creó una matriz de votación que guarda los resultados de la validación de las reglas de clasificación establecidas, en donde, las columnas de la matriz corresponden a los tipos de señales y las filas representan las características geométricas a evaluar, ver Tabla 18. El método consiste en poner un voto en el tipo de señal de tránsito que obtiene el mejor resultado en la comparación de alguna característica geométrica en particular. Por último, se

suman los votos por cada tipo de señal y el segmento es clasificado en el tipo de señal que obtiene la mayor cantidad de votos.

Tabla 18. Matriz de votación para la clasificación de señales de tránsito

	Preventiva (Cuadrado)	Informativa (Rectángulo)	Reglamentaria (Círculo)	Pare (Octágono)	Ceda el Paso (Triángulo)
Área					
Lados					
Ángulos					
Suma ángulos					

El primer paso para conducir a la clasificación de un segmento en una señal de tránsito, fue comparar el área de su envolvente convexa con el área de sus envolventes geométricas: MBR, MBC, MBO y MBT. Luego, se elige la envolvente geométrica que presente un porcentaje de similitud superior al 85% con respecto al área de la envolvente convexa. Por lo tanto, la primera regla que debe cumplir el modelo es:

- Si $Area\ MBR > 0.85 * Area\ ConvexHull \Rightarrow$
Probabilidad de un Cuadrado o Rectángulo
- Si $Area\ MBC > 0.85 * Area\ ConvexHull \Rightarrow$ *Probabilidad de un Círculo*
- Si $Area\ MBO > 0.85 * Area\ ConvexHull \Rightarrow$ *Probabilidad de un Octágono*
- Si $Area\ MBT > 0.85 * Area\ ConvexHull \Rightarrow$ *Probabilidad de un Triángulo*

En el caso que exista más de dos envolventes geométricas cuyas áreas se encuentren por encima del porcentaje de similitud establecido, entonces se selecciona la que tenga el mayor porcentaje con respecto al área de la envolvente convexa:

$$Si\ Área\ MBT \vee Área\ MBC \vee Área\ MBO \vee Área\ MBT > 0.85 * Área\ ConvexHull \Rightarrow$$

*Si %Área MBR > %Área MBC \wedge %Área MBO \wedge %Área MBT
 \Rightarrow Probabilidad de un Cuadrado o Rectángulo*

*Si %Área MBC > %Área MBR \wedge %Área MBO \wedge %Área MBT
 \Rightarrow Probabilidad de un Círculo*

*Si %Área MBO > %Área MBR \wedge %Área MBC \wedge %Área MBT
 \Rightarrow Probabilidad de un Octágono*

*Si %Área MBT > %Área MBR \wedge %Área MBC \wedge %Área MBO
 \Rightarrow Probabilidad de un Triángulo*

La segunda regla de validación del modelo consiste en la comparación de los valores de los lados de cada envolvente geométrica, con los valores de los lados de las señales de tránsito reglamentadas en el manual de señalización vial [87]. Por lo tanto, se asigna un voto en la columna de la matriz que corresponde al tipo de señal que obtiene la mayor similitud en los valores de sus lados.

*Si %Lado MBR > %Lado MBC \wedge %Lado MBO \wedge %Lado MBT
 \Rightarrow Probabilidad de un Cuadrado o Rectángulo*

*Si %Lado MBO > %Lado MBR \wedge %Lado MBC \wedge %Lado MBT
 \Rightarrow Probabilidad de un Octágono*

*Si %Área MBT > %Lado MBR \wedge %Lado MBC \wedge %Lado MBO
 \Rightarrow Probabilidad de un Triángulo*

La tercera regla de validación consiste en la comparación de los valores de los ángulos de cada envolvente geométrica, con los valores de los ángulos de las señales de tránsito reglamentadas en el manual de señalización vial [87]. Para el caso del círculo se genera un *cuadrilátero cíclico*, que consiste en un cuadrilátero inscrito dentro del círculo, cuyos vértices se encuentran sobre el borde del círculo. Igualmente, se asigna el voto a la columna de la matriz que corresponde al tipo de señal que obtiene la mayor similitud en los valores de sus lados.

*Si %Ángulo MBR > %Ángulo MBC \wedge %Ángulo MBO \wedge %Ángulo MBT
 \Rightarrow Probabilidad de un Cuadrado o Rectángulo*

*Si %Ángulo MBC > %Ángulo MBR \wedge %Ángulo MBO \wedge %Ángulo MBT
 \Rightarrow Probabilidad de un Círculo*

*Si %Ángulo MBO > %Ángulo MBR \wedge %Ángulo MBC \wedge %Ángulo MBT
 \Rightarrow Probabilidad de un Octágono*

*Si %Ángulo MBT > %Ángulo MBR \wedge %Ángulo MBC \wedge %Ángulo MBO
 \Rightarrow Probabilidad de un Triángulo*

La cuarta regla de validación consiste en la comparación de la sumatoria de los ángulos de cada envolvente geométrica, con el total de la suma de los ángulos de las señales de tránsito. De igual manera que la regla anterior se asigna la votación.

*Si % Σ Ángulo MBR
> % Σ Ángulo MBC \wedge % Σ Ángulo MBO \wedge % Σ Ángulo MBT
 \Rightarrow Probabilidad de un Cuadrado o Rectángulo*

*Si % Σ Ángulo MBC
> % Σ Ángulo MBR \wedge % Σ Ángulo MBO \wedge % Σ Ángulo MBT
 \Rightarrow Probabilidad de un Círculo*

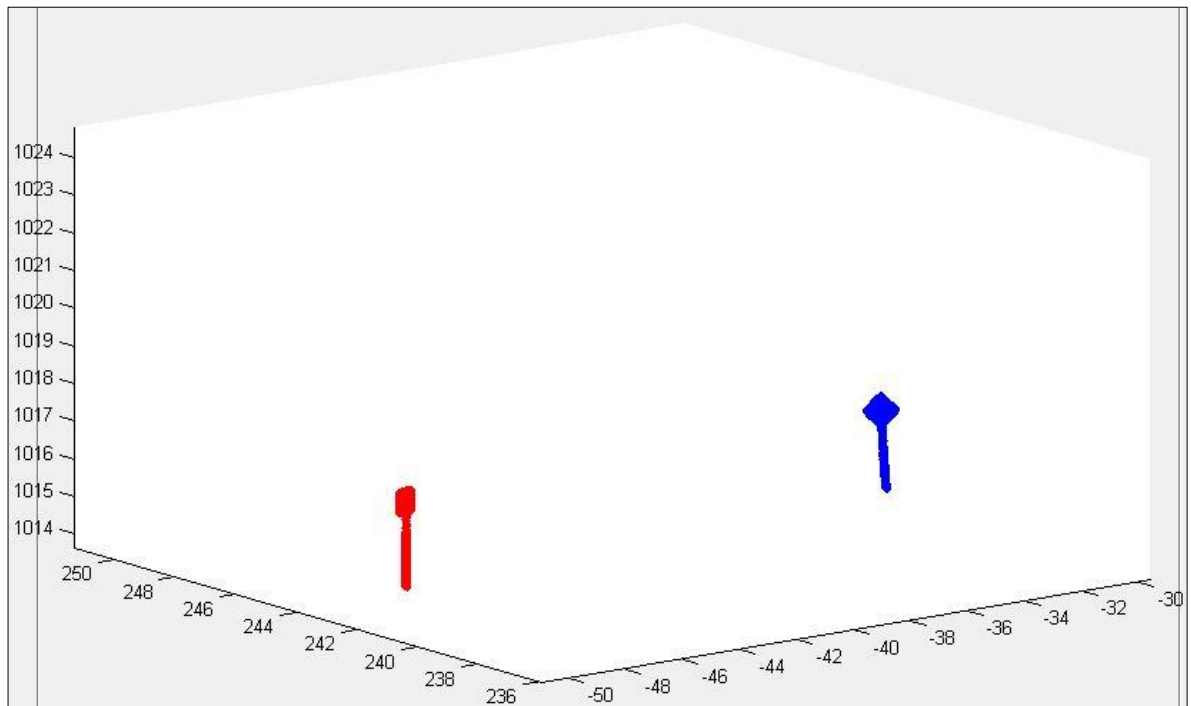
*Si % Σ Ángulo MBO
> % Σ Ángulo MBR \wedge % Σ Ángulo MBC \wedge % Σ Ángulo MBT
 \Rightarrow Probabilidad de un Octágono*

*Si % Σ Ángulo MBT
> % Σ Ángulo MBR \wedge % Σ Ángulo MBC \wedge % Σ Ángulo MBO
 \Rightarrow Probabilidad de un Triángulo*

Finalmente, se suman los votos por cada columna de la matriz que representan a cada tipo de señal de tránsito y aquella que obtenga el mayor número de votos será el tipo de señal al cual pertenece el segmento evaluado.

En la Figura 85 se presenta un ejemplo del resultado de la clasificación de las dos señales de tránsito que se encuentran en la Sección 8 de la nube de puntos.

Figura 85. Resultado de la clasificación de las señales de tránsito en la Sección 8



Fuente: Elaboración propia

5.9. MODELO TRIDIMENSIONAL

Una vez que se han clasificado los segmentos en los tipos de señales de tránsito existentes, se procedió a construir el modelo 3D de cada uno de ellos en el formato CityGML, que es el estándar para los modelos de ciudades

tridimensionales. Este archivo está basado en el formato XML, el cual permite su almacenamiento e intercambio. Una característica importante de CityGML es que está compuesto por módulos temáticos, por lo tanto, como el tema de este proyecto corresponde a un elemento de mobiliario urbano, entonces se utilizó el módulo de *CityFurniture*.

Para la construcción del modelo tridimensional del segmento clasificado, se seleccionaron los vértices correspondientes a su envolvente geométrica calculada en la etapa de clasificación. Las coordenadas de estos vértices son incluidas en el fragmento del archivo CityGML donde se construye el polígono. En la Figura 86, se visualiza el fragmento del archivo CityGML de la señal preventiva reconocida en la Sección 8, donde se incluyen las coordenadas de los vértices de esta señal.

Figura 86. Coordenadas de los vértices de la señal preventiva de la Sección 8 incluidas en el archivo CityGML

```

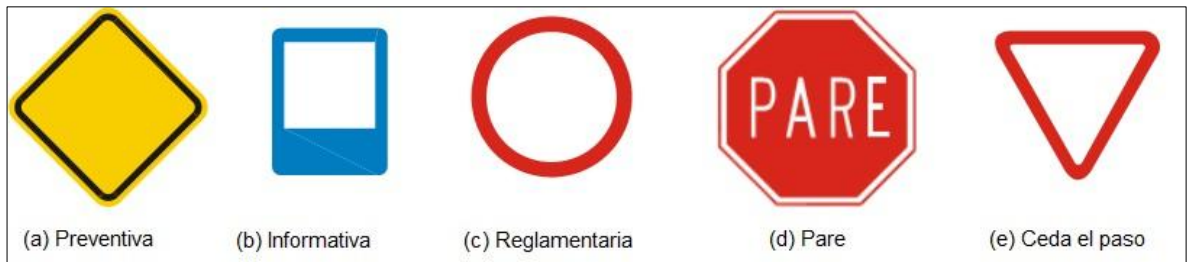
<!-- CityFurniture Signale -->
- <core:cityObjectMember>
  - <frn:CityFurniture gml:id="senal">
    <frn:function>1540</frn:function>
    - <frn:lod1Geometry>
      - <gml:MultiSurface>
        - <gml:surfaceMember>
          - <gml:Polygon gml:id="Poligono">
            - <gml:exterior>
              - <gml:LinearRing gml:id="PoligonoFront">
                <gml:pos>0.36 0 2.52</gml:pos>
                <gml:pos>-0.05 0 2.94</gml:pos>
                <gml:pos>0.4 0 3.36</gml:pos>
                <gml:pos>0.8 0 2.94</gml:pos>
                <gml:pos>0.36 0 2.52</gml:pos>
              </gml:LinearRing>
            </gml:exterior>
          </gml:Polygon>
        </gml:surfaceMember>
      - <gml:surfaceMember>
        - <gml:Polygon gml:id="Poligono">
          - <gml:exterior>
            - <gml:LinearRing gml:id="PoligonoBack">
              <gml:pos>0.36 0.002 2.52</gml:pos>
              <gml:pos>-0.05 0.002 2.94</gml:pos>
              <gml:pos>0.4 0.002 3.36</gml:pos>
              <gml:pos>0.8 0.002 2.94</gml:pos>
              <gml:pos>0.36 0.002 2.52</gml:pos>
            </gml:LinearRing>
          </gml:exterior>
        </gml:Polygon>
      </gml:surfaceMember>
    </gml:MultiSurface>
  </gml:lod1Geometry>
</core:cityObjectMember>

```

Fuente: Elaboración propia

De igual manera se adquirieron las imágenes de cada una de las señales de tránsito en formato PNG, ver Figura 87, para aplicar la textura a los modelos tridimensionales de los segmentos clasificados.

Figura 87. Imágenes de las señales de tránsito usadas para texturizar los modelos tridimensionales



Fuente: Elaboración propia

Para aplicar la textura a los modelos tridimensionales se referencia el nombre de la imagen en el fragmento correspondiente del archivo de CityGML y se asume que la imagen se encuentra dentro de un cuadrado cuyo valor de lado es 1, para poder establecer las coordenadas de los vértices de las imágenes. En la Figura 88 se muestra un ejemplo de la aplicación de la textura a una señal preventiva reconocida en la Sección 8. De igual manera se hizo la reconstrucción de los postes de las señales de tránsito, en el Anexo B de este trabajo se encuentra todo el archivo de CityGML de una de las señales de tránsito reconocida en la Sección 8.

Figura 88. Aplicación de la textura a la señal preventiva reconocida en la Sección 8

```

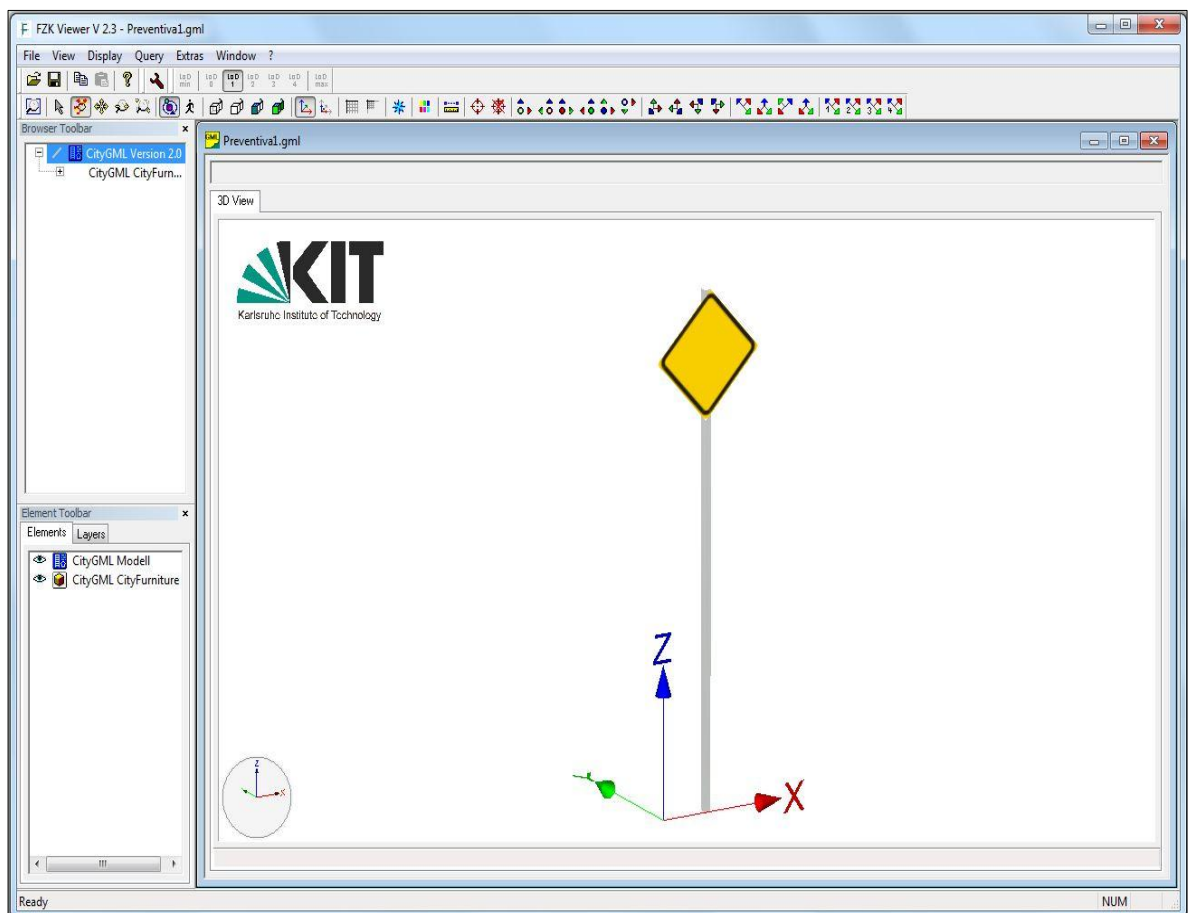
<!-- Appearance CityFurniture -->
- <app:appearanceMember>
  - <app:Appearance>
    - <app:surfaceDataMember>
      - <app:ParameterizedTexture>
        <app:imageURI>PreventivaFront.png</app:imageURI>
        <app:textureType>unknown</app:textureType>
        <app:wrapMode>wrap</app:wrapMode>
      - <app:target uri="#Poligono">
        - <app:TexCoordList>
          - <app:textureCoordinates ring="PoligonoFront">
            0.5 0.0 1.0 0.5 0.5 1.0 0.0 0.5 0.5 0.0
          </app:textureCoordinates>
        </app:TexCoordList>
      </app:target>
    </app:ParameterizedTexture>
  </app:surfaceDataMember>
</app:Appearance>
</app:appearanceMember>
- <app:appearanceMember>
  - <app:Appearance>
    - <app:surfaceDataMember>
      - <app:ParameterizedTexture>
        <app:imageURI>PreventivaBack.png</app:imageURI>
        <app:textureType>unknown</app:textureType>
        <app:wrapMode>wrap</app:wrapMode>
      - <app:target uri="#Poligono">
        - <app:TexCoordList>
          - <app:textureCoordinates ring="PoligonoBack">
            0.5 0.0 1.0 0.5 0.5 1.0 0.0 0.5 0.5 0.0
          </app:textureCoordinates>
        </app:TexCoordList>
      </app:target>
    </app:ParameterizedTexture>
  </app:surfaceDataMember>
</app:Appearance>
</app:appearanceMember>

```

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, para poder visualizar estos modelos tridimensionales es necesario usar un software que le permita reproducir este tipo de formato, para el caso de CityGML el formato es .GML. Para llevar a cabo la visualización de las señales de tránsito de este proyecto se utilizó un software gratis que fue desarrollado por el instituto alemán *Karlsruher Institut für Technologie (KIT)* denominado el *FZKViewer* [98]. En la Figura 89 se muestra la interfaz del FZKViewer visualizando una señal de tránsito.

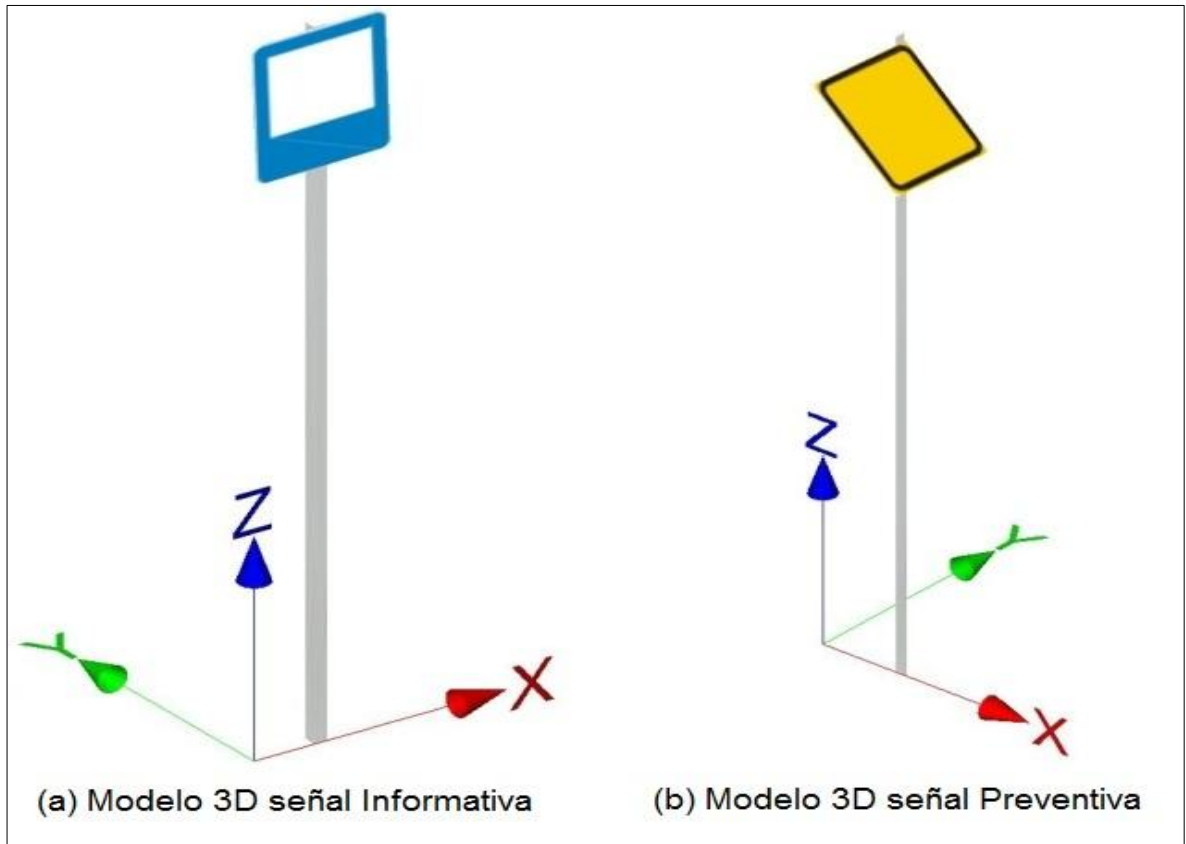
Figura 89. Interfaz del software FZKViewer para reproducir los modelos de CityGML



Fuente: Elaboración propia

Un ejemplo de la visualización de las dos señales de tránsito (una preventiva y una informativa) reconocidas en la Sección 8 se muestra en la Figura 90.

Figura 90. Señal de tránsito Preventiva e Informativa reconocidas dentro de la Sección 8 y reproducidas mediante FZKViewer



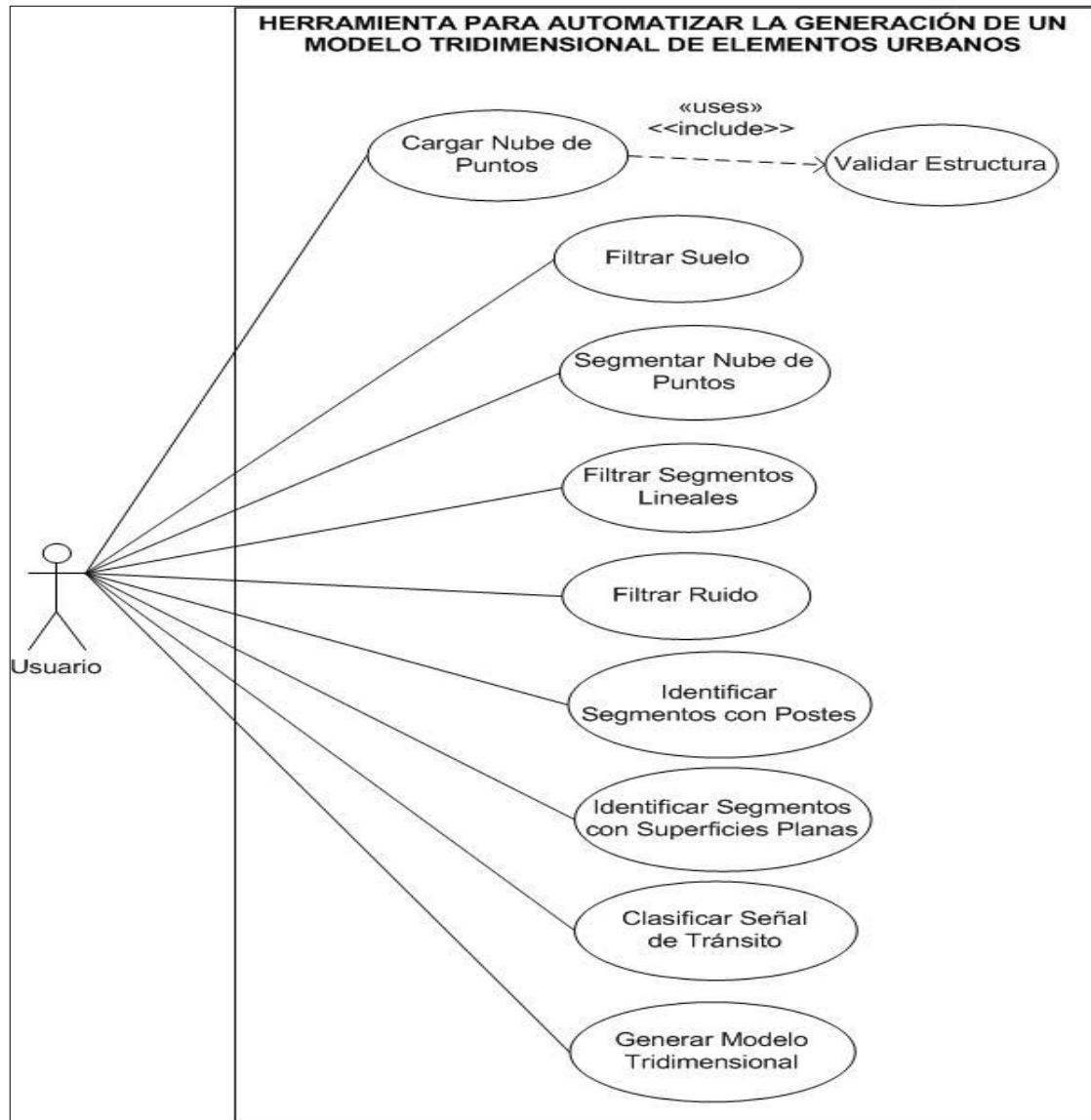
Fuente: Elaboración propia

5.10 HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

El desarrollo de la aplicación software se basó en la combinación entre la metodología clásica del reconocimiento de patrones y el prototipado evolutivo. Por lo tanto, en la Figura 91 se visualiza el diagrama de casos junto con la Tabla 19

que describen cada uno de ellos, los cuales permitieron orientar el desarrollo de esta herramienta y sus respectivos requerimientos funcionales y no funcionales.

Figura 91. Diagrama de Casos de Uso



Fuente: Elaboración propia

Tabla 19. Descripción de los Casos de Uso

Caso de Uso	Cargar Nube de Puntos.	
Actores	Usuario.	
Propósito	Permitir al usuario cargar la nube de puntos dese un archivo plano con formato ASCII.	
Descripción	En el menú de Abrir seleccionar la nube de puntos en formato ASCII.	
Precondición	El usuario previamente ha dividido la nube entera en secciones de aproximadamente un millón de puntos cada una, con el fin de obtener resultados más rápidamente.	
Flujo Principal	Acciones del Actor	Respuesta del Sistema
	1. Hacer clic en el ícono de Abrir ubicado en la barra de herramientas. 2. Una vez ubicado el directorio donde se encuentra la nube de puntos, hacer clic sobre el archivo en formato ASCII.	1. El sistema visualiza la nube de puntos seleccionada en los ejes del sistema de cartesianas tridimensionales.
Sub-flujos	Ninguno.	
Poscondición(es)	La nube de puntos ha sido cargada al sistema.	
Caso de Uso	Filtrar Suelo.	
Actores	Usuario.	
Propósito	El sistema aplica un filtro sobre la nube de puntos eliminado aquellos puntos que corresponden al suelo.	
Descripción	El sistema ejecuta el método OTSU con el fin de identificar y eliminar los puntos que corresponden al suelo.	
Precondición	El usuario debe haber cargado la sección de la nube de puntos a analizar.	
Flujo Principal	Acciones del Actor	Respuesta del Sistema
	1. Hacer clic en el botón de <i>Filtrar Suelo</i> ubicado en el panel de la izquierda.	1. El sistema aplica el método de OTSU para identificar cuáles puntos pertenecen al suelo, posteriormente los elimina. 2. En la tabla que se

		encuentra en la parte superior derecha de la interfaz gráfica, se puede seleccionar los puntos de suelo o los puntos que quedan por encima del suelo, para visualizarlos de una manera interactiva (diferente color).
Sub-flujos	Ninguno.	
Poscondición(es)	El sistema selecciona únicamente los puntos que pertenecen a los objetos que se encuentran por encima del suelo para hacer los análisis posteriores.	
Caso de Uso	Segmentar la Nube de Puntos.	
Actores	Usuario.	
Propósito	Permitir al usuario poder identificar cada uno de los clústeres que se encuentran dentro de la nube de puntos.	
Descripción	El sistema aplica un método de segmentación no supervisada basado en la teoría de grafos, para identificar individualmente los segmentos (clústeres) que se encuentran en la nube de puntos.	
Precondición	Ninguna	
Flujo Principal	Acciones del Actor	Respuesta del Sistema
	1. Hacer clic en el botón de <i>Clustering</i> , ubicado en el panel izquierdo.	1. El sistema lleva a cabo la segmentación de la nube de puntos con un método basado en la teoría de grafos llamado <i>RBNN</i> (del inglés Radially Bounded Nearest Neighbor) con el fin de identificar los clústeres que se encuentran dentro de la nube de puntos.
Sub-flujos	Ninguno	
Poscondición(es)	A través de la selección de cada uno de los segmentos en la tabla que se encuentra en la parte superior derecha de la interfaz, el sistema permite ver cada uno de los segmentos en el sistema de coordenadas.	

Caso de Uso	Filtrar Segmentos Lineales.	
Actores	Usuario.	
Propósito	El sistema aplica un filtro para identificar cuáles segmentos poseen forma lineal.	
Descripción	Una vez que han sido identificados cada uno de los clústeres, el sistema filtra aquellos que tienen forma alargada, mediante el análisis de componentes principales PCA.	
Precondición	El usuario debe haber previamente segmentado la nube de puntos en clústeres.	
Flujo Principal	Acciones del Actor	Respuesta del Sistema
	1. Hacer clic en el botón de <i>Segmentos Lineales</i> , ubicado en el panel de la izquierda.	1. El sistema analiza cada uno de los segmentos mediante el método PCA y selecciona aquellos que presenten forma alargada (o lineal).
Sub-flujos	Ninguno.	
Poscondición(es)	El sistema hace una clasificación por colores de cada uno de los segmentos de acuerdo con la forma (lineal, plana, volumétrica) que éstos presenten. Luego selecciona los segmentos lineales para el análisis posterior.	
Caso de Uso	Filtrar Ruido.	
Actores	Usuario.	
Propósito	Eliminar el ruido que se presenta alrededor de los segmentos debido a las diferentes condiciones del ambiente que se presentaron en el momento del escaneo.	
Descripción	El sistema aplica el filtrado del ruido mediante las características propias de la densidad de puntos de cada segmento.	
Precondición	Ninguna.	
Flujo Principal	Acciones del Actor	Respuesta del Sistema
	1. Hacer clic en el botón de <i>Filtrar Ruido</i> , ubicado en el panel izquierdo.	1. El sistema analiza cada uno de los segmentos lineales y con base a su densidad calcula los puntos que se encuentran bastante alejados del segmento identificándolos

		como ruido.
Sub-flujos	Ninguno	
Poscondición(es)	El sistema clasifica por colores los puntos que son válidos dentro del segmento y los que se consideran como ruido.	
Caso de Uso	Identificar Segmentos con Postes.	
Actores	Usuario.	
Propósito	Dentro de los segmentos lineales identificar cuáles de ellos poseen una estructura similar a un poste.	
Descripción	El sistema divide cada segmento en deciles (dividir los valores de la coordenada Z en partes iguales) y recorre de abajo hacia arriba cada uno de los deciles analizando su ancho. Aquellos deciles que de manera continua no cambian su valor de ancho son considerados como poste, por lo tanto, se deduce que el segmento analizado está conformado por este elemento.	
Precondición	Ninguna.	
Flujo Principal	Acciones del Actor	Respuesta del Sistema
	1. Hacer clic en el botón de <i>Segmentos con Postes</i> , ubicado en el panel izquierdo.	1. El sistema identifica los segmentos que están conformados por un elemento poste.
Sub-flujos	Ninguno	
Poscondición(es)	El sistema identifica el elemento poste con un color diferente dentro del segmento y se puede seleccionar a través de la tabla que se encuentra ubicada en la parte superior derecha de la interfaz gráfica.	
Caso de Uso	Identificar Segmentos con Superficies Planas.	
Actores	Usuario.	
Propósito	Identificar que los puntos que no corresponden a un elemento poste presentan una forma plana.	
Descripción	Los segmentos que estaban conformados por un elemento poste, se analizan los puntos que no hacen parte del poste y se aplica el método de RANSAC para identificar si se ajustan a una superficie plana.	
Precondición	Ninguna.	
Flujo Principal	Acciones del Actor	Respuesta del Sistema

	1. Hacer clic en el botón de <i>Segmentos con Superficies Planas</i> , ubicado en el panel izquierdo.	1. El sistema identifica aquellos segmentos que presentan alguna característica plana en los puntos que no hacen parte del elemento poste.
Sub-flujos	Ninguno	
Poscondición(es)	El sistema identifica con un color diferente, la región del segmento donde los puntos hacen parte de una superficie plana. Esta parte del segmento es la que va a usar para llevar a cabo la clasificación.	
Caso de Uso	Clasificar Señal de Tránsito.	
Actores	Usuario.	
Propósito	Reconocer si el segmento pertenece a cualquiera de los tipos de señales de tránsito que se encuentran en el entorno urbano.	
Descripción	Se lleva a cabo una transformación geométrica de 3D a 2D con el grupo de puntos que hacen parte de una superficie plana, luego se aplica una envolvente convexa para comparar su área con el área del rectángulo mínimo envolvente (MBR), el círculo mínimo envolvente (MBC), el triángulo mínimo envolvente (MBT) y el octágono mínimo envolvente (MBO) de la nube de puntos. El área que tenga una similitud de más del 90% con respecto a la de la envolvente convexa va a definir la forma geométrica del segmento (rectangular, cuadrada, circular, triangular u octogonal). Finalmente, se compara los valores de los lados y ángulos de la forma geométrica con los de la señal de tránsito reglamentada por el Manual de Señalización del Ministerio de Transporte.	
Precondición	Ninguna.	
Flujo Principal	Acciones del Actor	Respuesta del Sistema
	1. Hacer clic en el botón de <i>Clasificación</i> , ubicado en el panel izquierdo.	1. El sistema clasifica cada uno de los segmentos en la señal de tránsito correspondiente y visualiza en la tabla el porcentaje de

		coincidencia con respecto a los valores que se encuentran reglamentados por la norma del Manual de Señalización.
Sub-flujos	Ninguno	
Poscondición(es)	El sistema clasifica por colores los tipos de señales de tránsito identificadas y selecciona los vértices de cada una de ellas para llevar a cabo el proceso siguiente.	
Caso de Uso	Generar Modelo Tridimensional.	
Actores	Usuario.	
Propósito	Generar un modelo tridimensional en el estándar CityGML de las señales de tránsito reconocidas.	
Descripción	El sistema extrae los vértices de cada una de las señales de tránsito clasificadas y genera el archivo .GML de cada una de ellas para que puedan ser visualizadas a través de una aplicación que pueda interpretar dicho archivo (para este caso, se utilizó un software libre llamado FZK Viewer).	
Precondición	Ninguna.	
Flujo Principal	Acciones del Actor	Respuesta del Sistema
	1. Hacer clic en el botón de <i>Modelo Tridimensional</i> , ubicado en el panel izquierdo.	1. El sistema pregunta al usuario el directorio donde desea almacenar los archivos .GML de las señales de tránsito. 2. El sistema guarda los archivos .GML de las señales de tránsito en el directorio seleccionado por el usuario. Luego, el sistema le pregunta nuevamente al usuario que seleccione el archivo .EXE de la aplicación con la que va a visualizar el modelo tridimensional de las señales. 3. Una vez seleccionada la aplicación, ejecuta la

		visualización de cada una de las señales de tránsito de forma individual.
Sub-flujos	Ninguno	
Poscondición(es)	Tener un software que permita la visualización de objetos tridimensionales en formato .GML que es el formato que utiliza el estándar CityGML.	

6. RESULTADOS

Después de desarrollado la herramienta de software, se llevaron a cabo pruebas de validación para la clasificación de las señales de tránsito. Para cada sección de nube de puntos se calcularon el número total de señales clasificadas por clase (Preventiva, Informativa y Reglamentaria).

Se hicieron dos pruebas de validación, la primera consistió en utilizar todos los parámetros asignados por defecto, sin intervención del usuario para finalmente analizar y evaluar los resultados obtenidos. La segunda prueba se permitió el ajuste de los parámetros por parte del usuario de acuerdo con las etapas que se estaban revisando.

Para cada una de las pruebas se construyeron tablas de verdad con el fin de determinar la cantidad de señales de tránsito clasificadas correcta o incorrectamente. Las filas corresponden a la clasificación real, mientras que las columnas hacen referencia a la clasificación realizada por la herramienta.

Para definir los criterios de efectividad para la metodología propuesta se toma como base las fórmulas de sensibilidad, efectividad y valor predictivo positivo que se usa en el tratamiento digital de imágenes.

$$\text{sensibilidad} = \frac{\text{verdaderos_positivos}}{\text{verdaderos_positivos} + \text{falsos_positivos}} * 100$$

$$\text{especificidad} = \frac{\text{verdaderos_negativos}}{\text{verdaderos_negativos} + \text{falsos_positivos}} * 100$$

$$valor_predictivo_positivo = \frac{verdaderos_positivos}{verdaderos_positivos + falsos_positivos} * 100$$

Los resultados de la prueba son presentados en la Tabla 20.

Tabla 20. Clasificación de Señales de Tránsito por la Herramienta

Clasificación Real	Clasificación por la Herramienta					
	Negativa	Preventiva	Informativa	Reglamentaria	Pare	Ceda el Paso
Negativa	13	1	0	1	0	0
Preventiva	0	2	0	1	0	0
Informativa	0	0	7	0	0	0
Reglamentaria	0	0	0	4	1	0
Pare	0	0	0	1	1	0
Ceda el Paso	0	0	0	0	0	1

Falsos Negativos	1
Falsos Positivos	2

Conforme a las ecuaciones presentadas se tiene:

$$sensibilidad = \frac{2 + 7 + 4 + 1 + 1}{2 + 7 + 4 + 1 + 1 + 1} * 100 = 93.23\%$$

$$especificidad = \frac{13}{13 + 2} * 100 = 86.67\%$$

$$valor_predictivo_positivo = \frac{2 + 7 + 4 + 1 + 1}{2 + 7 + 4 + 1 + 1 + 2} * 100 = 88.23\%$$

Finalmente, a partir de la efectividad de los resultados encontrados, se confirma que la prueba de clasificación de señales de tránsito en un corredor vial urbano es

posible realizarse a través de técnicas de reconocimiento de patrones, respondiéndose a la pregunta de investigación planteada para este trabajo.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo de la tecnología del escáner láser ha revolucionado la forma del levantamiento de la información topográfica tanto en el área urbana como en la rural. La gran ventaja que tiene esta tecnología es la rapidez y la precisión con la que captura la información y la representa en forma de nube de puntos, donde cada punto contiene las coordenadas XYZ, el valor de reflectancia del material y el color de las superficies escaneadas.

El gran volumen de datos recolectados a través del TLS, ha impulsado el desarrollo de investigaciones para llevar a cabo el tratamiento de dicha nube de puntos, algunos de ellos se han enfocado en el desarrollo de algoritmos para el registro, filtrado, segmentación y visualización de nube de puntos, mientras que otros trabajos han hecho énfasis en el reconocimiento y clasificación de objetos. De igual manera, se han presentado investigaciones en las cuales se combinan varios procesos de los anteriormente mencionados, con el fin de obtener mejores resultados en el reconocimiento y clasificación de los objetos.

La metodología empleada para este trabajo de investigación y los algoritmos desarrollados para este proceso lograron detectar adecuadamente las señales de tránsito presentes en un entorno urbano. De esta manera el grupo de investigación Geomática, cuenta con una herramienta de software base para continuar con su propósito de generar modelos tridimensionales de ciudades que sirvan como apoyo en los procesos de planeación urbana por parte de las entidades gubernamentales.

La generación de modelos tridimensionales a partir de una nube de puntos, es un proceso que hasta ahora está en evolución, dado que no existen algoritmos lo

suficientemente robustos que logren reconocer todos los objetos de una escena y los transforme luego a un modelo tridimensional satisfactorio. Algunos algoritmos que existen actualmente, logran generar modelos de forma automática pero de algunos temas específicos y con un nivel de detalle aceptable, por lo tanto, para llegar a un alto nivel de detalle en los modelos tridimensionales, es necesario hacer un tratamiento de la nube de puntos de forma particular y en algunos casos su refinamiento se hace de forma manual.

Aunque los resultados son satisfactorios, el escaneo de este corredor vial sólo contiene una pequeña muestra de señales de tránsito. Es así, que la continuidad de la investigación actual debe ser extendida a otras vías de la ciudad y a otros sectores como es caso de las vías intermunicipales y nacionales.

Para disminuir el tiempo de procesamiento y evitar la partición de la nube de puntos en secciones, se recomienda el diseñar y desarrollar algoritmos basados en la tecnología de computación de alto rendimiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W. Carter, "The Lunar Laser Ranging Pointing Problem," University of Arizona, 1973.
- [2] J. C. Fernandez Diaz, "Scientific Applications of the Mobile Terrestrial Laser Scanner System," University of Florida, 2007.
- [3] D. Laefer, L. Truong Hong, and M. Fitzgerald, "Processing of terrestrial laser scanning point cloud data for computational modelling of building facades," *Recent Patents on Computer Science*, vol. 4, no. 1, pp. 16–29, 2011.
- [4] G. Sithole and G. Vosselman, "Automatic structure detection in a point-cloud of an urban landscape," *Proceedings 2nd GRSS/IPRS joint workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas*, Berlín, Alemania, pp. 67–71, 2003.
- [5] G. Vosselman and S. Dijkman, "3D building model reconstruction from point clouds and ground plans," *International Archives of Photogrammetric, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 34, no. 3/W4, pp. 37–44, 2001.
- [6] B. Van Genchten, *Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning*, no. June. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2008, pp. 1–241.
- [7] L. Bornaz and F. Rinaudo, "Terrestrial laser scanner data processing," in *Proceedings of XX ISPRS Commission V Congress*, 2004, vol. 45, no. B5, pp. 514–519.
- [8] L. Yan, Z. Li, and H. Xie, "Segmentation of unorganized point cloud from terrestrial laser scanner in urban region," *18th International Conference on Geoinformatics*, IEEE, Beijing, China, pp. 1–5, Jun-2010.
- [9] C. Fröhlich and M. Mettenleiter, "Terrestrial Laser Scanning – New Perspectives in 3D Surveying," *International archives of photogrammetry*,

Remote Sensing and Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 36, no. 8, pp. 7–13, 2004.

- [10] Optech, “ILRIS Terrestrial Laser Scanner,” *Junio*, 2012. [Online]. Available: http://www.optech.ca/pdf/ILRIS_SpecSheet_110309_Web.pdf.
- [11] Leica, “Leica ScanStation C10,” *Junio*, 2012. [Online]. Available: http://www.leica-geosystems.es/es/Leica-ScanStation-C10_79411.htm.
- [12] Riegl, “Riegl Laser Measurement System,” *Junio*, 2012. [Online]. Available: <http://www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning>.
- [13] Trimble, “Trimble VX Spatial Station,” *Junio*, 2012. [Online]. Available: http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-348124/022543-261F_TrimbleVX_DS_0110_Ir.pdf.
- [14] Z+F, “Z+F Profiler 5010 Technical Data,” *Junio*, 2012. [Online]. Available: http://www.zf-uk.com/downloads/5010_Specs.pdf.
- [15] Trimble, “Trimble FX Scanner Datasheet,” *Junio*, 2012. [Online]. Available: http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-397918/022504-105B_TrimbleFX_DS_0610_LR.pdf.
- [16] Leica, “HDS7000 Laser Scanner,” *Junio*, 2012. [Online]. Available: http://www.leica-geosystems.es/es/HDS7000_90337.htm.
- [17] Faro, “Faro Laser Scanner Focus 3D,” *Junio*, 2012. [Online]. Available: <http://www.faro.com/focus/es>.
- [18] Konica-Minolta, “3D Laser Scanner VIVID 910,” *Junio*, 2012. [Online]. Available: <http://sensing.konicaminolta.us/wp-content/uploads/2011/04/vivid-910-brief.pdf>.
- [19] Y. Reshetyuk, “Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning,” Royal Institute of Technology - KTH, Estocolmo, Suecia, 2009.
- [20] M. Dash and H. Liu, “Feature Selection for Classification,” *Intelligent Data Analysis*, vol. 1, no. 3, pp. 137–156, 1997.
- [21] H. Almuallim and T. Dietterich, “Learning with many irrelevant features,” in *Proceeding of Ninth National Conference on Artificial Intelligence*, 1992, pp. 547–552.

- [22] K. Kira and L. Rendell, "The feature selection problem: Traditional methods and a new algorithm," in *Proceedings of Ninth National Conference on Artificial Intelligence*, 1992, pp. 129–134.
- [23] P. Narendra and K. Fukunaga, "A branch and bound algorithm for Feature Subset Selection," *IEEE Transactions on Computers*, vol. C–26, no. 9, pp. 917–922, 1971.
- [24] G. Sithole, *Segmentation and Classification of Airborne Laser Scanner Data*, no. May. Delft, Holanda: NCG, Nederlandse Commissie voor Geodesie, 2005, p. 203.
- [25] E. Leal and N. Leal, "Point cloud denoising using robust principal component analysis," *Conference on Computer Graphics Theory and ...*, pp. 51–58, 2006.
- [26] E. Leal and N. Leal, "Point Cloud Denoising Using Robust Principal Component Analysis," in *Proceedings of the First International Conference on Computer Graphics Theory and Applications*, 2006, pp. 51–58.
- [27] J. Berkmann and T. Caelli, "Computation of surface geometry and segmentation using covariance techniques," *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 16, no. 11, pp. 1114–1116, 1994.
- [28] M. Mitra, A. Nguyen, and L. Guibas, "Estimating surface normals in noisy point cloud data," *International Journal of Computational Geometry and Applications*, vol. 14, no. 4, pp. 261–276, 2004.
- [29] J. Weingarten, G. Gruener, and R. Siegwart, "A fast and robust 3D feature extraction algorithm for structured environment reconstruction," *Proceedings of 11th International Conference on Advanced Robotic (ICAR)*, 2003.
- [30] M. Pauly, M. Gross, and L. Kobbelt, "Efficient simplification of point sampled surfaces," in *Proceedings of the conference on Visualization, IEEE Computer Society*, 2002, pp. 163–170.
- [31] S. Liberge, B. Soheilian, N. Chehata, and N. Paparoditis, "Extraction of Vertical Posts in 3D Laser Point Clouds acquired in Dense Urban Areas by a Mobile Mapping System," in *International Archives of Photogrammetry*,

- Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2010, vol. 38, no. 3B, pp. 126–130.
- [32] H. Yokoyama, H. Date, S. Kanai, and H. Takeda, “Pole-like objects recognition from mobile laser scanning data using smoothing and principal component analysis,” *ISPRS Workshop, Laser Scanning 2011*, vol. 38, no. W12, pp. 115–120, 2011.
- [33] M. Lehtomäki, A. Jaakkola, J. Hyypä, A. Kukko, and H. Kaartinen, “Detection of Vertical Pole-Like Objects in Road Environment Using Vehicle-Based Laser Scanning Data,” *Remote Sensing, MDPI*, vol. 2, no. 3, pp. 641–664, 2010.
- [34] S. I. El-Halawany, A. Moussa, D. Lichti, and N. El-Sheimy, “Detection of road curb from mobile terrestrial laser scanner point cloud,” *ISPRS workshop, Laser scanning 2011*, vol. 38, no. 5, p. 6, 2011.
- [35] S. I. El-Halawany and D. Lichti, “Detection of Road Poles from Mobile Terrestrial Laser Scanner Point Cloud,” in *International Workshop on Multi-Platform/Multi-Sensor Remote Sensing and Mapping (M2RSM)*, 2011, pp. 1–6.
- [36] S. Pu and G. Vosselman, “Automatic extraction of building features from terrestrial laser scanning,” *Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 35, no. 6, 2006.
- [37] S. Becker and N. Haala, “Combine Feature Extraction for Façade Reconstruction,” *International Archives of Photogrammetric, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 36, no. 3, pp. 44–49, 2007.
- [38] S. Pu and G. Vosselman, “Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data,” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 64, no. 6, pp. 575–584, Nov. 2009.
- [39] S. Pu, M. Rutzinger, G. Vosselman, and S. Oude Elberink, “Recognizing basic structures from mobile laser scanning data for road inventory studies,”

- Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 66, no. 6, pp. S28–S39, Dec. 2011.
- [40] M. Rutzinger, B. Höfle, M. Hollaus, and N. Pfeifer, “Object-Based Point Cloud Analysis of Full-Waveform Airborne Laser Scanning Data for Urban Vegetation Classification,” *Sensors*, vol. 8, no. 8, pp. 4505–4528, 2008.
- [41] F. Rottensteiner, J. Trinder, S. Clode, and K. Kubik, “Using the Dempster-Shafer method for the fusion of LIDAR data and multi-spectral images for building detection,” *Information fusion*, vol. 6, no. 4, pp. 283–300, 2005.
- [42] G. Vosselman, “Advanced Point Cloud Processing,” *In Photogrammetric Week’09*. pp. 137–146, 2009.
- [43] T. Rabbani, F. Van den Heuvel, and G. Vosselman, “Segmentation of point clouds using smoothness constraint,” *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 36, no. 5, pp. 248–253, 2005.
- [44] D. Belton, “Classification and Segmentation of 3D TLS Point Clouds,” Curtin University of Technology, 2008.
- [45] J. Wang and J. Shan, “Segmentation of Lidar Point Clouds for Building Extraction,” in *American Society Photogrammetric Remote Sensing Annual 2009*, 2009.
- [46] H. Hoppe, T. DeRose, T. Dumpchamp, J. McDonald, and W. Stuetzle, “Surface reconstruction from unorganized points,” *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, vol. 26, no. 2, pp. 71–78, 1992.
- [47] R. Johnson and W. Wichern, *Applied Multivariate Statistical Analysis*, 5th ed. New Jersey, USA: Prentice Hall, 2002.
- [48] C. Shakarji, “Least-squares fitting algorithms of the NIST algorithm testing system,” *Journal of Research of the National Institute of Standard and Technology*, vol. 6, no. 106, pp. 633–641, 1998.
- [49] H. Woo, E. Kang, S. Wang, and K. H. Lee, “A new segmentation method for point cloud data,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, no. 2, pp. 167–178, Jan. 2002.

- [50] G. Vosselman, B. G. H. Gorte, G. Sithole, and T. Rabbani, "Recognising Structure in Laser Scanner Point Clouds," *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 46, no. 8/W2, pp. 33–38, 2004.
- [51] P. P. Sapkota, "Segmentation of Coloured Point Cloud Data," International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, 2008.
- [52] A. Hoover and et. al., "An Experimental Comparison of Range Image Segmentation Algorithms," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence Archives*, vol. 18, no. 7, pp. 673–689, 1996.
- [53] S. Filin, "Surface clustering from airborne laser scanning data," *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 34, no. 3, pp. 119–124, 2002.
- [54] M. Roggero, "Object segmentation with region growing and principal component analysis," *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 34, no. 3A, pp. 289–294, 2002.
- [55] C. Zahan, "Graph-theoretical methods for detecting and describing gestalt clusters," *IEEE Transactions on Computers*, vol. 20, no. 1, pp. 68–86, 1971.
- [56] K. Klasing, D. Wollherr, and M. Buss, "A clustering method for efficient segmentation of 3D laser data," *Conference on Robotics and Automation, ICRA 2008. IEEE International*, IEEE, Munich, Alemania, pp. 4043–4048, May-2008.
- [57] X. Jiang and H. Bunke, "Fast Segmentation of Range Images into Planar Regions by Scan Line Grouping," *Machine Vision and Applications*, vol. 7, no. 2, pp. 115–122, 1994.
- [58] R. Schnabel, W. Roland, R. Wessel, and R. Klein, "Shape Recognition in 3D Point Clouds," Bonn, Alemania, 2007.
- [59] R. Schnabel, R. Wahl, and R. Klein, "Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection," *Computer Graphics Forum*, vol. 26, no. 2, pp. 214–226, 2007.

- [60] H. Boulaassal, P. Landes, F. Grussenmeyer, and F. Tarsha-Kurdi, "Automatic Segmentation of Building Facades using Terrestrial Laser Data," *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*, vol. XXXVI, pp. 65–70, 2007.
- [61] B. Gorte and N. Pfeifer, "Structuring Laser-Scanned Trees using 3D Mathematical Morphology," *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 35, no. B5, pp. 929–933, 2004.
- [62] A. Velizhev, R. Shapovalov, and K. Schindler, "Implicit Shape Models for Object Detection in 3D Point Clouds," in *ISPRS of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, vol. 1, no. 3.
- [63] S. Pu and G. Vosselman, "Building facade reconstruction by fusing terrestrial laser points and images.," *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 9, no. 6, pp. 4525–4542, Jan. 2009.
- [64] C. Brenner, "Extraction of Features from Mobile Laser Scanning Data for Future Driver Assistance Systems," in *Proceedings of AGILE Conference 2009*, 2009, pp. 25–42.
- [65] D. Lichti and B. Harvey, "Effects of reflecting surface material properties on time-of-flight laser scanner measurements," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 34, no. 4, 2002.
- [66] N. Pfeifer, P. Dorninger, A. Haring, and H. Fan, "Investigating terrestrial laser scanning intensity data: Quality and functional relations," *In Optical 3-D Measurement Techniques VIII*, pp. 328–337, 2007.
- [67] S. Gordon, D. Lichti, and M. Stewart, "Application of a high-resolution, ground-based laser scanner for deformation measurements," *In Proceedings of 10th International FIG Symposium on Deformation Measurements*, pp. 23–32, 2001.
- [68] D. Lichti, "Spectral filtering and classification of terrestrial laser scanner point clouds," *The Photogrammetric Record*, vol. 20, no. 111, pp. 218–240, 2005.

- [69] J. Jansa, N. Studnicka, G. Forkert, A. Haring, and H. Kager, "Terrestrial laserscanning and photogrammetry - acquisition techniques complementing one another," *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 35, 2004.
- [70] A. Golovinskiy, V. G. Kim, and T. Funkhouser, "Shape-based recognition of 3D point clouds in urban environments," in *International Conference on Computer Vision - ICCV*, 2009, pp. 2154–2161.
- [71] D. Belton and D. Lichti, "Classification and segmentation of terrestrial laser scanner point clouds using local variance information," *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 36, no. 5, pp. 44–49, 2006.
- [72] C. Luo and G. Sohn, "Terrestrial Laser Scanning Data Classification Using Expectation Maximization Algorithm," in *The XXII Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012.
- [73] C. Brenner, "Towards Fully Automatic Generation of City Models," *International Archives of Photogrammetric, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 33, no. 3, pp. 85–92, 2000.
- [74] R. Goldman, *An Integrated Introduction to Computer Graphics and Geometric Modeling*, 1st ed. CRC Press, 2009, p. 543.
- [75] C. Hoffman and J. Rossignac, "A Road Map to Solid Modeling," *IEEE Transaction on Visualization and Computation Graphics*, vol. 2, no. 1, pp. 3–10, 1996.
- [76] W. Lorensen and H. Cline, "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm," *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, vol. 21, no. 4, pp. 163–169, 1987.
- [77] S. Azernikov and A. Fischer, "Efficient surface reconstruction method for distributed CAD," *Computer-Aided Design*, vol. 36, no. 9, pp. 799–808, 2004.
- [78] S. Pu and G. Vosselman, "Extracting windows from terrestrial laser scanning," *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 36, no. 3, pp. 320–325, 2007.

- [79] S. Pu, "Automatic building modeling from terrestrial laser scanning," in *Advances in 3D Geoinformation Systems*, Springer Berlin Heidelberg, 2007, pp. 147–160.
- [80] C. B. Barber, D. Dobkin, and H. Huhdanpaa, "The Quickhull Algorithm for Convex Hulls," *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, vol. 22, no. 4, pp. 469–483, 1996.
- [81] J. Boissonnat, "Geometric Structures for Three Dimensional Shape Representation," *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 3, no. 4, pp. 266–286, 1984.
- [82] C. Bradley and B. Currie, "Advances in the Field of Reverse Engineering," *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 2, no. 5, pp. 697–706, 2005.
- [83] P. Young, T. Beresford-West, S. Coward, B. Notarberardino, B. Walker, and A. Abdul-Aziz, "An efficient approach to converting three-dimensional image data into highly accurate computational models," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 366, no. 1878, pp. 3155–3173, 2008.
- [84] M. Viceconti, C. Zannoni, and L. Pierotti, "TRI2SOLID: An Application of Reverse Engineering Methods to the Creation of CAD Models of Bone Segments," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 56, no. 3, pp. 211–220, 1998.
- [85] G. Gröger, T. Kolbe, A. Czerwinski, and C. Nagel, *OpenGIS® City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard*. Open Geospatial Consortium Inc., 2008.
- [86] T. Kolbe, G. Gröger, and L. Plümer, "CityGML - 3D City Models for Emergency Response," in *Geospatial Information Technology for Emergency Response*, ISPRS book., Taylor & Francis, 2008.
- [87] Ministerio de Transporte, Ministerio_Industria_y_Comercio, INVIAS, Secretaría_de_tránsito_y_transporte_de_Bogotá, and Fondo_de_Prevencción_Vial, *Manual de Señalización Vial*. Bogotá: Fondo de Prevencción Vial, 2004, p. 609.

- [88] Geomática Universidad Industrial de Santander, “Observatorio SIG de Bucaramanga,” 2010. [Online]. Available: <http://garza.uis.edu.co/observatoriosigbucaramanga/>.
- [89] Google, “Google Earth.” [Online]. Available: <http://www.google.com/earth/index.html>.
- [90] Riegl, *RiSCAN PRO*. 2011, p. 393.
- [91] N. Otsu, “A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, no. 1, pp. 62–66, 1979.
- [92] H. Yokoyama, H. Date, S. Kanai, and H. Takeda, “Pole-like objects recognition from mobile laser scanning data,” *ISPRS Workshop, Laser scanning 2011*, vol. 38, 2011.
- [93] F. Monnier, B. Vallet, and B. Soheilian, “Trees detection from laser point clouds acquired in dense urban areas by a mobile mapping system,” *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. I, no. September, pp. 245–250, 2012.
- [94] R. B. Rusu, Z. C. Marton, N. Blodow, M. Dolha, and M. Beetz, “Towards 3D Point cloud based object maps for household environments,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 56, no. 11, pp. 927–941, Nov. 2008.
- [95] S. Theodoridis and K. Koutroumbas, *Pattern Recognition*, 4th ed. Academic Press, 2009, p. 967.
- [96] D. Borrmann, J. Elseberg, K. Lingemann, and A. Nüchter, “The 3D Hough Transform for Plane Detection in Point Clouds: A Review and a new Accumulator Design,” *Journal of 3D Research*, vol. 2, no. 2, 2011.
- [97] M. A. Fischler and R. C. Bolles, “Random Sample Consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography,” *Communications of the ACM*, vol. 24, no. 6, pp. 381–395, 1981.
- [98] K. Karlsruher Institut für Technologie, “FZKViewer,” 2013. [Online]. Available: <http://www.iai.fzk.de/www-extern/index.php?id=1931&L=1>.

BIBLIOGRAFÍA

A. Golovinskiy, V. G. Kim, and T. Funkhouser, "Shape-based recognition of 3D point clouds in urban environments," in International Conference on Computer Vision - ICCV, 2009, pp. 2154–2161.

A. Hoover and et. al., "An Experimental Comparison of Range Image Segmentation Algorithms," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence Archives, vol. 18, no. 7, pp. 673–689, 1996.

A. Velizhev, R. Shapovalov, and K. Schindler, "Implicit Shape Models for Object Detection in 3D Point Clouds," in ISPRS of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2012, vol. 1, no. 3.

B. Gorte and N. Pfeifer, "Structuring Laser-Scanned Trees using 3D Mathematical Morphology," International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 35, no. B5, pp. 929–933, 2004.

B. Van Genchten, Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning, no. June. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2008, pp. 1–241.

C. B. Barber, D. Dobkin, and H. Huhdanpaa, "The Quickhull Algorithm for Convex Hulls," ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS), vol. 22, no. 4, pp. 469–483, 1996.

C. Bradley and B. Currie, "Advances in the Field of Reverse Engineering," Computer-Aided Design and Applications, vol. 2, no. 5, pp. 697–706, 2005.

C. Brenner, "Extraction of Features from Mobile Laser Scanning Data for Future Driver Assistance Systems," in Proceedings of AGILE Conference 2009, 2009, pp. 25–42.

C. Brenner, "Towards Fully Automatic Generation of City Models," International Archives of Photogrammetric, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 33, no. 3, pp. 85–92, 2000.

C. Fröhlich and M. Mettenleiter, "Terrestrial Laser Scanning – New Perspectives in 3D Surveying," International archives of photogrammetry, Remote Sensing and Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 36, no. 8, pp. 7–13, 2004.

C. Hoffman and J. Rossignac, "A Road Map to Solid Modeling," IEEE Transaction on Visualization and Computation Graphics, vol. 2, no. 1, pp. 3–10, 1996.

C. Luo and G. Sohn, "Terrestrial Laser Scanning Data Classification Using Expectation Maximization Algorithm," in The XXII Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2012.

C. Shakarji, "Least-squares fitting algorithms of the NIST algorithm testing system," Journal of Research of the National Institute of Standard and Technology, vol. 6, no. 106, pp. 633–641, 1998.

C. Zahan, "Graph-theoretical methods for detecting and describing gestalt clusters," IEEE Transactions on Computers, vol. 20, no. 1, pp. 68–86, 1971.

D. Belton, "Classification and Segmentation of 3D TLS Point Clouds," Curtin University of Technology, 2008.

D. Belton and D. Lichti, "Classification and segmentation of terrestrial laser scanner point clouds using local variance information," *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 36, no. 5, pp. 44–49, 2006.

D. Borrmann, J. Elseberg, K. Lingemann, and A. Nüchter, "The 3D Hough Transform for Plane Detection in Point Clouds : A Review and a new Accumulator Design," *Journal of 3D Research*, vol. 2, no. 2, 2011.

D. Laefer, L. Truong Hong, and M. Fitzgerald, "Processing of terrestrial laser scanning point cloud data for computational modelling of building facades," *Recent Patents on Computer Science*, vol. 4, no. 1, pp. 16–29, 2011.

D. Lichti and B. Harvey, "Effects of reflecting surface material properties on time-of-flight laser scanner measurements," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 34, no. 4, 2002.

D. Lichti, "Spectral filtering and classification of terrestrial laser scanner point clouds," *The Photogrammetric Record*, vol. 20, no. 111, pp. 218–240, 2005.

E. Leal and N. Leal, "Point cloud denoising using robust principal component analysis," *Conference on Computer Graphics Theory and ...*, pp. 51–58, 2006.

E. Leal and N. Leal, "Point Cloud Denoising Using Robust Principal Component Analysis," in *Proceedings of the First International Conference on Computer Graphics Theory and Applications*, 2006, pp. 51–58.

F. Monnier, B. Vallet, and B. Soheilian, "Trees detection from laser point clouds acquired in dense urban areas by a mobile mapping system," *ISPRS Annals of the*

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. I, no. September, pp. 245–250, 2012.

F. Rottensteiner, J. Trinder, S. Clode, and K. Kubik, “Using the Dempster-Shafer method for the fusion of LIDAR data and multi-spectral images for building detection,” *Information fusion*, vol. 6, no. 4, pp. 283–300, 2005.

Faro, “Faro Laser Scanner Focus 3D,” Junio, 2012. [Online]. Available: <http://www.faro.com/focus/es>.

G. Gröger, T. Kolbe, A. Czerwinski, and C. Nagel, *OpenGIS® City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard*. Open Geospatial Consortium Inc., 2008.

G. Sithole, *Segmentation and Classification of Airborne Laser Scanner Data*, no. May. Delft, Holanda: NCG, Nederlandse Commissie voor Geodesie, 2005, p. 203.

G. Sithole and G. Vosselman, “Automatic structure detection in a point-cloud of an urban landscape,” *Proceedings 2nd GRSS/IPRS joint workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas*, Berlín, Alemania, pp. 67–71, 2003.

G. Vosselman and S. Dijkman, “3D building model reconstruction from point clouds and ground plans,” *International Archives of Photogrammetric, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 34, no. 3/W4, pp. 37–44, 2001.

G. Vosselman, “Advanced Point Cloud Processing,” In *Photogrammetric Week’09*. pp. 137–146, 2009.

G. Vosselman, B. G. H. Gorte, G. Sithole, and T. Rabbani, “Recognising Structure in Laser Scanner Point Clouds,” *The International Archives of Photogrammetry*,

Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 46, no. 8/W2, pp. 33–38, 2004.

Geomática Universidad Industrial de Santander, “Observatorio SIG de Bucaramanga,” 2010. [Online]. Available: <http://garza.uis.edu.co/observatoriosigbucaramanga/>.

Google, “Google Earth.” [Online]. Available: <http://www.google.com/earth/index.html>.

H. Almuallim and T. Dietterich, “Learning with many irrelevant features,” in Proceeding of Ninth National Conference on Artificial Intelligence, 1992, pp. 547–552.

H. Boulaassal, P. Landes, F. Grussenmeyer, and F. Tarsha-Kurdi, “Automatic Segmentation of Building Facades using Terrestrial Laser Data,” ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, vol. XXXVI, pp. 65–70, 2007.

H. Hoppe, T. DeRose, T. Dumpchamp, J. McDonald, and W. Stuetzle, “Surface reconstruction from unorganized points,” ACM SIGGRAPH Computer Graphics, vol. 26, no. 2, pp. 71–78, 1992.

H. Yokoyama, H. Date, S. Kanai, and H. Takeda, “Pole-like objects recognition from mobile laser scanning data using smoothing and principal component analysis,” ISPRS Workshop, Laser Scanning 2011, vol. 38, no. W12, pp. 115–120, 2011.

H. Yokoyama, H. Date, S. Kanai, and H. Takeda, “Pole-like objects recognition from mobile laser scanning data,” ISPRS Workshop, Laser scanning 2011, vol. 38, 2011.

H. Woo, E. Kang, S. Wang, and K. H. Lee, "A new segmentation method for point cloud data," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, no. 2, pp. 167–178, Jan. 2002.

J. Berkmann and T. Caelli, "Computation of surface geometry and segmentation using covariance techniques," *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 16, no. 11, pp. 1114–1116, 1994.

J. Boissonnat, "Geometric Structures for Three Dimensional Shape Representation," *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 3, no. 4, pp. 266–286, 1984.

J. C. Fernandez Diaz, "Scientific Applications of the Mobile Terrestrial Laser Scanner System," University of Florida, 2007.

J. Jansa, N. Studnicka, G. Forkert, A. Haring, and H. Kager, "Terrestrial laserscanning and photogrammetry - acquisition techniques complementing one another," *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 35, 2004.

J. Wang and J. Shan, "Segmentation of Lidar Point Clouds for Building Extraction," in *American Society Photogrammetric Remote Sensing Annual 2009*, 2009.

J. Weingarten, G. Gruener, and R. Siegwart, "A fast and robust 3D feature extraction algorithm for structured environment reconstruction," *Proceedings of 11th International Conference on Advanced Robotic (ICAR)*, 2003.

K. Karlsruher Institut für Technologie, "FZKViewer," 2013. [Online]. Available: <http://www.iai.fzk.de/www-extern/index.php?id=1931&L=1>.

K. Kira and L. Rendell, "The feature selection problem: Traditional methods and a new algorithm," in Proceedings of Ninth National Conference on Artificial Intelligence, 1992, pp. 129–134.

K. Klasing, D. Wollherr, and M. Buss, "A clustering method for efficient segmentation of 3D laser data," Conference on Robotics and Automation, ICRA 2008. IEEE International, IEEE, Munich, Alemania, pp. 4043–4048, May-2008.

Konica-Minolta, "3D Laser Scanner VIVID 910," Junio, 2012. [Online]. Available: <http://sensing.konicaminolta.us/wp-content/uploads/2011/04/vivid-910-brief.pdf>.

L. Bornaz and F. Rinaudo, "Terrestrial laser scanner data processing," in Proceedings of XX ISPRS Commission V Congress, 2004, vol. 45, no. B5, pp. 514–519.

L. Yan, Z. Li, and H. Xie, "Segmentation of unorganized point cloud from terrestrial laser scanner in urban region," 18th International Conference on Geoinformatics, IEEE, Beijing, China, pp. 1–5, Jun-2010.

Leica, "HDS7000 Laser Scanner," Junio, 2012. [Online]. Available: http://www.leica-geosystems.es/es/HDS7000_90337.htm.

Leica, "Leica ScanStation C10," Junio, 2012. [Online]. Available: http://www.leica-geosystems.es/es/Leica-ScanStation-C10_79411.htm.

M. A. Fischler and R. C. Bolles, "Random Sample Consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," Communications of the ACM, vol. 24, no. 6, pp. 381–395, 1981.

M. Dash and H. Liu, "Feature Selection for Classification," *Intelligent Data Analysis*, vol. 1, no. 3, pp. 137–156, 1997.

M. Lehtomäki, A. Jaakkola, J. Hyyppä, A. Kukko, and H. Kaartinen, "Detection of Vertical Pole-Like Objects in Road Environment Using Vehicle-Based Laser Scanning Data," *Remote Sensing*, MDPI, vol. 2, no. 3, pp. 641–664, 2010.

M. Mitra, A. Nguyen, and L. Guibas, "Estimating surface normals in noisy point cloud data," *International Journal of Computational Geometry and Applications*, vol. 14, no. 4, pp. 261–276, 2004.

M. Pauly, M. Gross, and L. Kobbelt, "Efficient simplification of point sampled surfaces," in *Proceedings of the conference on Visualization*, IEEE Computer Society, 2002, pp. 163–170.

M. Rutzinger, B. Höfle, M. Hollaus, and N. Pfeifer, "Object-Based Point Cloud Analysis of Full-Waveform Airborne Laser Scanning Data for Urban Vegetation Classification," *Sensors*, vol. 8, no. 8, pp. 4505–4528, 2008.

M. Roggero, "Object segmentation with region growing and principal component analysis," *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 34, no. 3A, pp. 289–294, 2002.

M. Viceconti, C. Zannoni, and L. Pierotti, "TRI2SOLID: An Application of Reverse Engineering Methods to the Creation of CAD Models of Bone Segments," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 56, no. 3, pp. 211–220, 1998.

Ministerio de Transporte, Ministerio_Industria_y_Comercio, INVIAS, Secretaría_de_tránsito_y_transporte_de_Bogotá, and Fondo_de_Prevencción_Vial, Manual de Señalización Vial. Bogotá: Fondo de Prevención Vial, 2004, p. 609.

N. Otsu, "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 9, no. 1, pp. 62–66, 1979.

N. Pfeifer, P. Dorninger, A. Haring, and H. Fan, "Investigating terrestrial laser scanning intensity data: Quality and functional relations," In Optical 3-D Measurement Techniques VIII, pp. 328–337, 2007.

Optech, "ILRIS Terrestrial Laser Scanner," Junio, 2012. [Online]. Available: http://www.optech.ca/pdf/ILRIS_SpecSheet_110309_Web.pdf.

P. Narendra and K. Fukunaga, "A branch and bound algorithm for Feature Subset Selection," IEEE Transactions on Computers, vol. C-26, no. 9, pp. 917–922, 1971.

P. P. Sapkota, "Segmentation of Coloured Point Cloud Data," International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, 2008.

P. Young, T. Beresford-West, S. Coward, B. Notarberardino, B. Walker, and A. Abdul-Aziz, "An efficient approach to converting three-dimensional image data into highly accurate computational models," Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 366, no. 1878, pp. 3155–3173, 2008.

R. B. Rusu, Z. C. Marton, N. Blodow, M. Dolha, and M. Beetz, "Towards 3D Point cloud based object maps for household environments," Robotics and Autonomous Systems, vol. 56, no. 11, pp. 927–941, Nov. 2008.

R. Johnson and W. Wichern, Applied Multivariate Statistical Analysis, 5th ed. New Jersey, USA: Prentice Hall, 2002.

R. Goldman, An Integrated Introduction to Computer Graphics and Geometric Modeling, 1st ed. CRC Press, 2009, p. 543.

Riegl, "Riegl Laser Measurement System," Junio, 2012. [Online]. Available: <http://www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning>.

Riegl, RiSCAN PRO. 2011, p. 393.

R. Schnabel, W. Roland, R. Wessel, and R. Klein, "Shape Recognition in 3D Point Clouds," Bonn, Alemania, 2007.

R. Schnabel, R. Wahl, and R. Klein, "Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection," Computer Graphics Forum, vol. 26, no. 2, pp. 214–226, 2007.

S. Azernikov and A. Fischer, "Efficient surface reconstruction method for distributed CAD," Computer-Aided Design, vol. 36, no. 9, pp. 799–808, 2004.

S. Becker and N. Haala, "Combine Feature Extraction for Façade Reconstruction," International Archives of Photogrammetric, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 36, no. 3, pp. 44–49, 2007.

S. Filin, "Surface clustering from airborne laser scanning data," International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 34, no. 3, pp. 119–124, 2002.

S. Gordon, D. Lichti, and M. Stewart, "Application of a high-resolution, ground-based laser scanner for deformation measurements," In Proceedings of 10th International FIG Symposium on Deformation Measurements, pp. 23–32, 2001.

S. I. El-Halawany, A. Moussa, D. Lichti, and N. El-Sheimy, "Detection of road curb from mobile terrestrial laser scanner point cloud," ISPRS workshop, Laser scanning 2011, vol. 38, no. 5, p. 6, 2011.

S. I. El-Halawany and D. Lichti, "Detection of Road Poles from Mobile Terrestrial Laser Scanner Point Cloud," in International Workshop on Multi-Platform/Multi-Sensor Remote Sensing and Mapping (M2RSM), 2011, pp. 1–6.

S. Liberge, B. Soheilian, N. Chehata, and N. Paparoditis, "Extraction of Vertical Posts in 3D Laser Point Clouds acquired in Dense Urban Areas by a Mobile Mapping System," in International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2010, vol. 38, no. 3B, pp. 126–130.

S. Pu, "Automatic building modeling from terrestrial laser scanning," in Advances in 3D Geoinformation Systems, Springer Berlin Heidelberg, 2007, pp. 147–160.

S. Pu and G. Vosselman, "Automatic extraction of building features from terrestrial laser scanning," Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 35, no. 6, 2006.

S. Pu and G. Vosselman, "Building facade reconstruction by fusing terrestrial laser points and images.," Sensors (Basel, Switzerland), vol. 9, no. 6, pp. 4525–4542, Jan. 2009.

S. Pu and G. Vosselman, "Extracting windows from terrestrial laser scanning," *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 36, no. 3, pp. 320–325, 2007.

S. Pu and G. Vosselman, "Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 64, no. 6, pp. 575–584, Nov. 2009.

S. Pu, M. Rutzinger, G. Vosselman, and S. Oude Elberink, "Recognizing basic structures from mobile laser scanning data for road inventory studies," *Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 66, no. 6, pp. S28–S39, Dec. 2011.

S. Theodoridis and K. Koutroumbas, *Pattern Recognition*, 4th ed. Academic Press, 2009, p. 967.

T. Kolbe, G. Gröger, and L. Plümer, "CityGML - 3D City Models for Emergency Response," in *Geospatial Information Technology for Emergency Response*, ISPRS book., Taylor & Francis, 2008.

T. Rabbani, F. Van den Heuvel, and G. Vosselman, "Segmentation of point clouds using smoothness constraint," *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 36, no. 5, pp. 248–253, 2005.

Trimble, "Trimble VX Spatial Station," Junio, 2012. [Online]. Available: http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-348124/022543-261F_TrimbleVX_DS_0110_lr.pdf.

Trimble, "Trimble FX Scanner Datasheet," Junio, 2012. [Online]. Available: http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-397918/022504-105B_TrimbleFX_DS_0610_LR.pdf.

W. Carter, "The Lunar Laser Ranging Pointing Problem," University of Arizona, 1973.

W. Lorensen and H. Cline, "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm," ACM SIGGRAPH Computer Graphics, vol. 21, no. 4, pp. 163–169, 1987.

X. Jiang and H. Bunke, "Fast Segmentation of Range Images into Planar Regions by Scan Line Grouping," Machine Vision and Applications, vol. 7, no. 2, pp. 115–122, 1994.

Y. Reshetyuk, "Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning," Royal Institute of Technology - KTH, Estocolmo, Suecia, 2009.

Z+F, "Z+F Profiler 5010 Technical Data," Junio, 2012. [Online]. Available: http://www.zf-uk.com/downloads/5010_Specs.pdf.

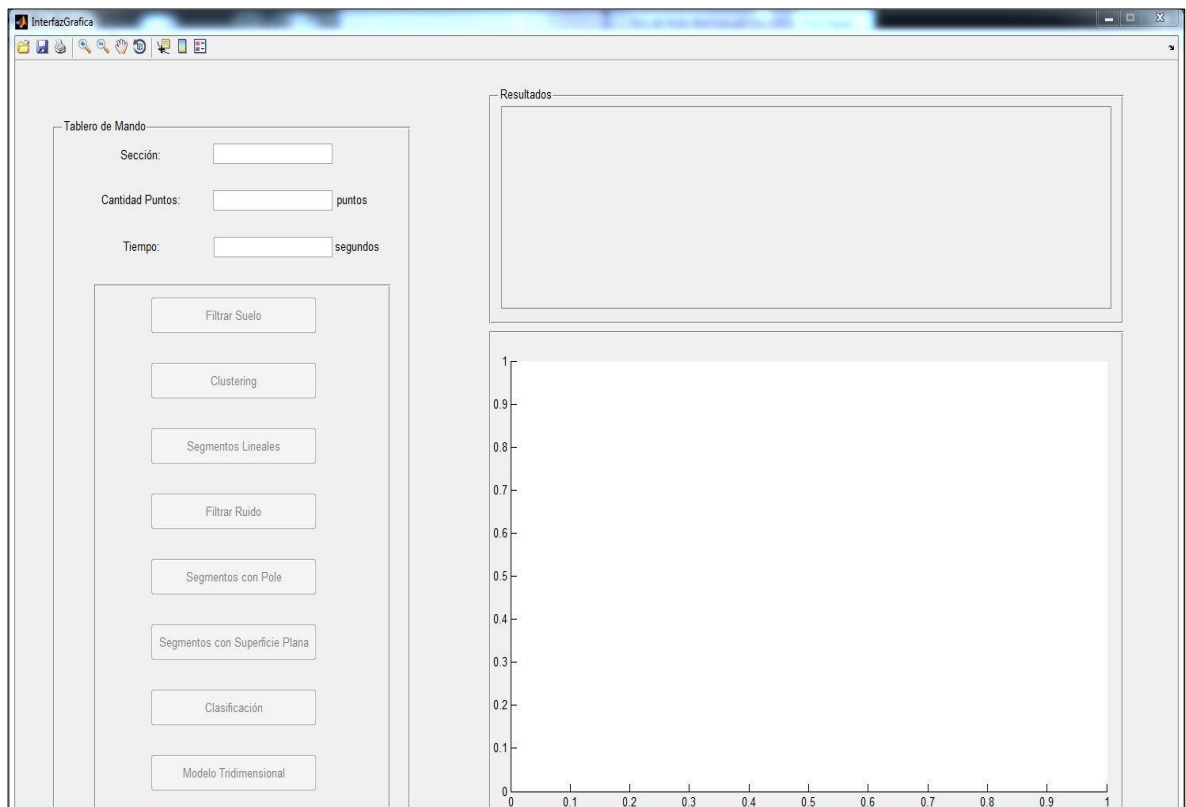
ANEXOS

ANEXO A. FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

A.1. Descripción general

La herramienta software que soporta el modelo computacional fue desarrollado en su totalidad en Matlab® R2012b. El archivo que ejecuta la interfaz gráfica del usuario se llama *InterfazGrafica.m*, presentando una ventana principal como se visualiza en la Figura 92.

Figura 92. Ventana principal de la Herramienta Software



Fuente: Elaboración propia

La ventana principal consta de:

- Una barra de herramientas ubicada en la parte superior, ver Figura 93, que contiene una serie de botones con las siguientes funciones (de izquierda a derecha):

Figura 93. Barra de Herramientas



Fuente: Elaboración propia

- *Abrir*, permite buscar archivo con formato .TXT que contenga las coordenadas de una nube de puntos. Si el archivo no contiene una estructura similar a la de una nube de puntos, se lanza un mensaje de Error.
 - *Guardar*, este botón permite exportar la nube de puntos resultante del proceso que se esté realizando en ese momento.
 - *Imprimir*, permite imprimir la nube de puntos que se encuentra visualizada en el eje de coordenadas.
 - *Acercar*, para acercar el eje de coordenadas en una región determinada.
 - *Alejar*, para alejarse de una región determinada en el eje de coordenadas.
 - *Mover*, permite moverse de forma vertical y horizontal en el eje de coordenadas.
 - *Rotar 3D*, para rotar la nube de puntos alrededor de los tres ejes de coordenadas.
 - *Cursor Información*, sirve para obtener la información de las coordenadas XYZ del punto que se selecciona.
- La interfaz también está conformada por un grupo de botones distribuidos verticalmente que se encuentran al lado izquierdo y contienen los diferentes

procesos que se deben llevar a cabo para la generación de los modelos 3D de las señales de tránsito. Los botones están distribuidos de la siguiente manera, ver Figura 94:

Figura 94. Botones para realizar paso a paso la generación del modelo 3D de las señales de tránsito

The image shows a control panel titled "Tablero de Mando". It contains three input fields at the top: "Sección:" with an empty text box, "Cantidad Puntos:" with an empty text box followed by the unit "puntos", and "Tiempo:" with an empty text box followed by the unit "segundos". Below these fields is a large rectangular area containing eight buttons stacked vertically. The buttons are labeled: "Filtrar Suelo", "Clustering", "Segmentos Lineales", "Filtrar Ruido", "Segmentos con Pole", "Segmentos con Superficie Plana", "Clasificación", and "Modelo Tridimensional".

Fuente: Elaboración propia

- *Filtrar Suelo*, esta opción le permite al usuario filtrar los puntos que corresponden al suelo, permitiendo una reducción en el tiempo de cómputo en las etapas siguientes.
 - *Clustering*, esta opción se encarga de realizar la segmentación basada en la teoría de grafos, con los puntos que pertenecen a los objetos que están por encima del suelo.
 - *Segmentos Lineales*, tiene como función identificar cuáles segmentos tienen forma lineal, plana o volumétrica.
 - *Filtrar Ruido*, esta opción se encarga de filtrar el ruido que se presenta alrededor de los segmentos.
 - *Segmentos con Poste*, tiene como función identificar cuáles segmentos están compuestos por un poste, dentro de aquellos que fueron identificados como lineales en el proceso anterior.
 - *Segmentos con Superficies Planas*, se identifican aquellos segmentos que contengan una región de puntos que se ajustan a una superficie plana.
 - *Clasificación*, con esta opción se lleva a cabo el proceso de clasificar cada uno de los segmentos en algún tipo de señal de tránsito.
 - *Modelo Tridimensional*, a partir de los vértices de los segmentos reconocidos como señal de tránsito, se genera el archivo CityGML con el modelo tridimensional. Luego, solicita al usuario el directorio donde desea almacenar el archivo. Por último, le solicita al usuario que seleccione la aplicación (.EXE) con la que desea reproducir el archivo de CityGML.
- La interfaz también cuenta con una tabla para visualizar los resultados que entregan cada uno de los procesos anteriormente mencionados, ver Figura 95.

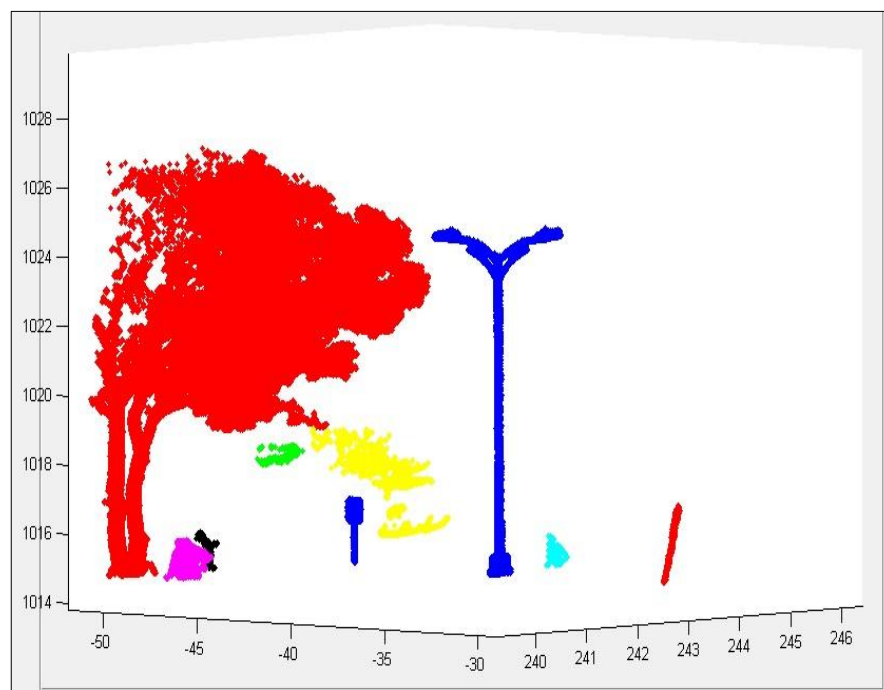
Figura 95. Tabla de Resultados

Resultados		
Cluster	Forma	Cantidad Puntos
1	Lineal	1338
2	Lineal	4749
3	Plana	216
4	Lineal	233
5	Lineal	156
6	Plana	878
7	Lineal	2811
8	Lineal	9183
9	Lineal	99676

Fuente: Elaboración propia

- También cuenta con un sistema de ejes de coordenadas tridimensionales que permite visualizar los resultados de los diferentes procesos que se llevan a cabo con la nube de puntos, ver Figura 96.

Figura 96. Eje de coordenadas para visualizar la nube de puntos

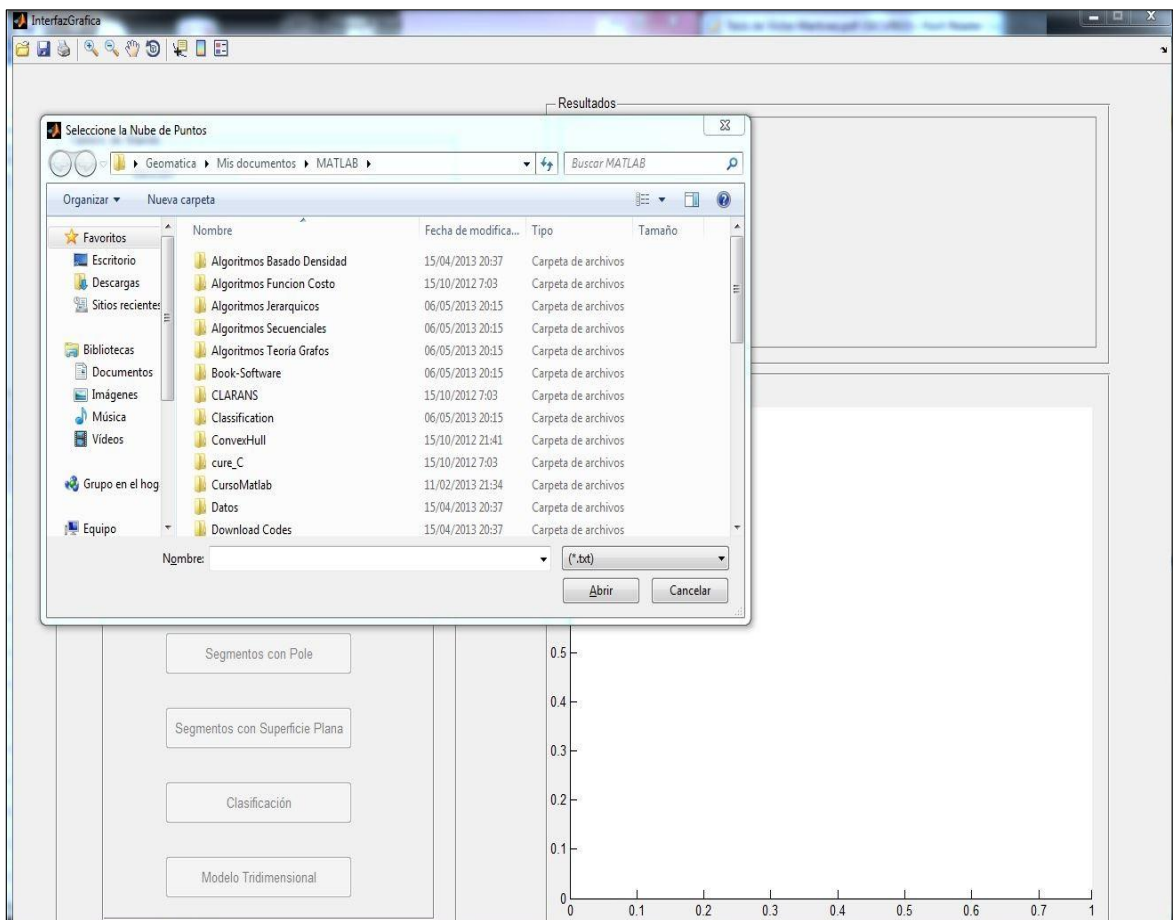


Fuente: Elaboración propia

A.2. Funcionamiento de la Interfaz Gráfica:

Al seleccionar la opción *Abrir* se despliega una ventana de exploración con el fin de buscar la nube de puntos en formato .TXT que se desea analizar, ver Figura 97.

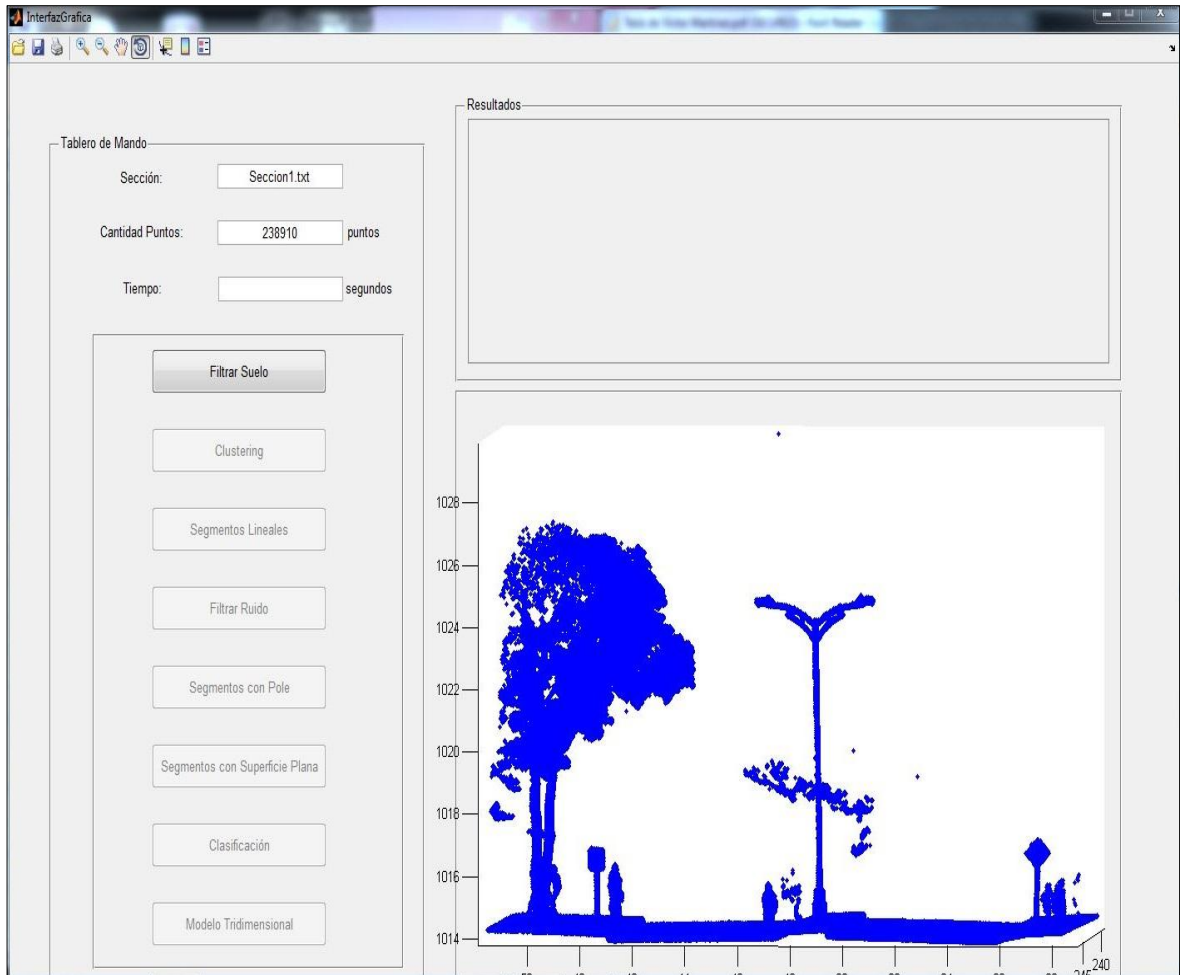
Figura 97. Opción Abrir Nube de Puntos



Fuente: Elaboración propia

Una vez seleccionada la nube de puntos, el software la mantendrá en memoria para ser procesada y al mismo tiempo la visualizará en el eje de coordenadas tridimensionales, ver Figura 98 e inmediatamente se habilitará la opción de *Filtrar Suelo*.

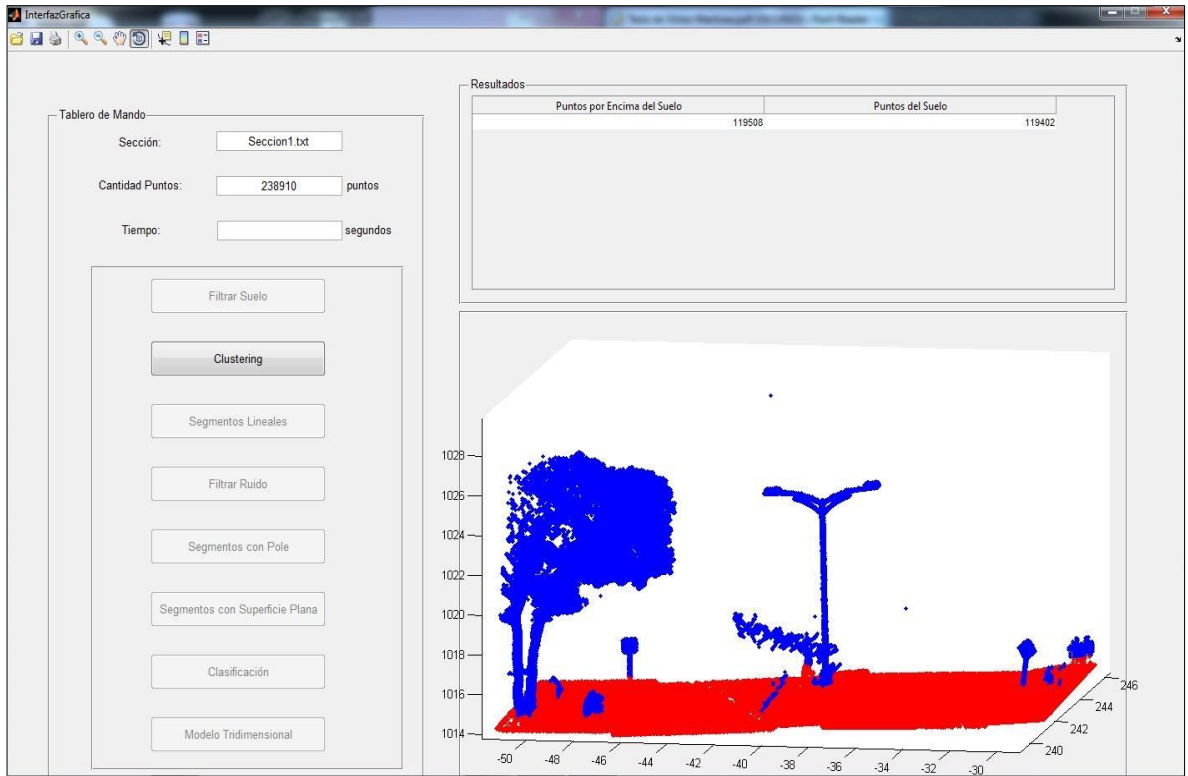
Figura 98. Nube de puntos cargada en la herramienta software



Fuente: Elaboración propia

Al hacer clic en la opción de *Filtrar Suelo*, se ejecutará el algoritmo de Otsu y el de las normales de cada punto, descrito en el capítulo de segmentación. Este resultado se visualizará en el eje de coordenadas y en la tabla adjunta. Por último, habilitará la opción de *Clustering*, como se muestra en la Figura 99 .

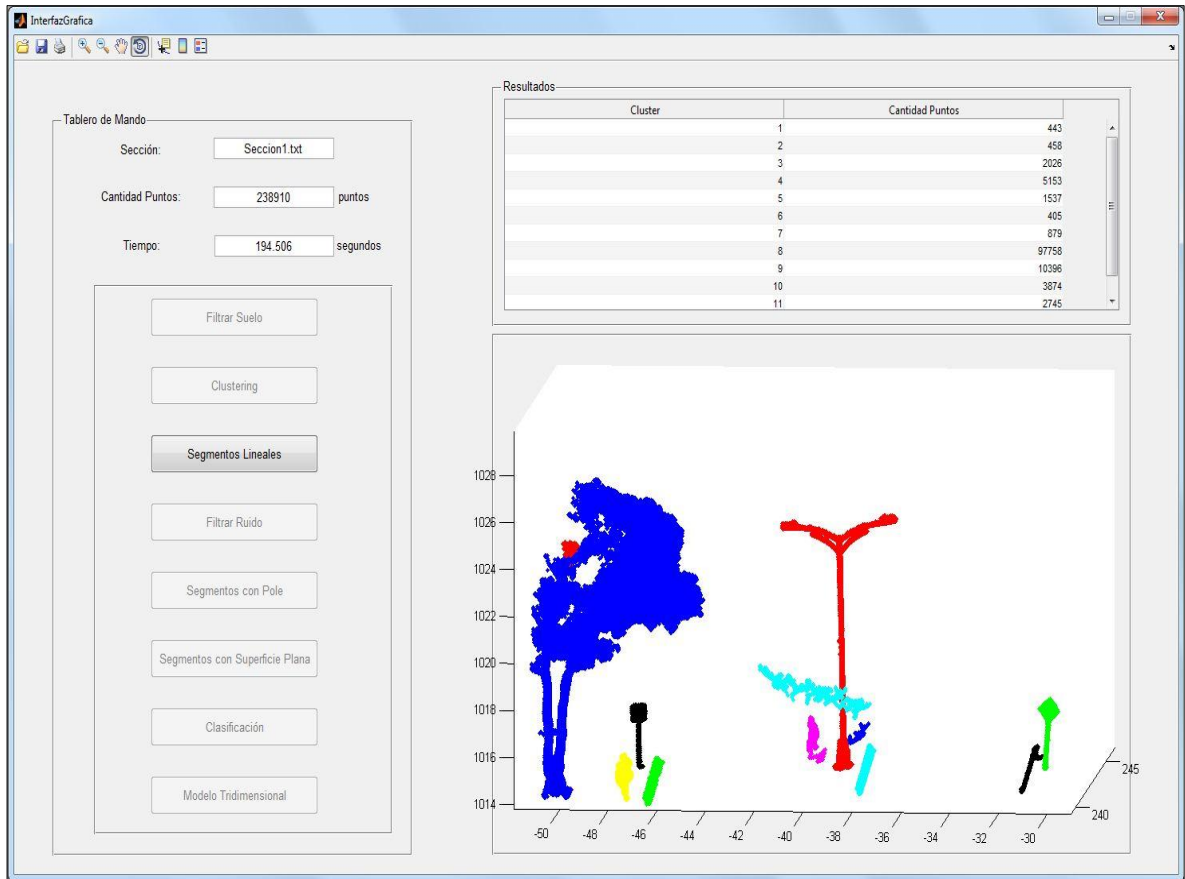
Figura 99. Resultado del filtrado de los puntos del Suelo



Fuente: Elaboración propia

Cuando se hace clic sobre la opción de *Clustering*, se lleva a cabo la segmentación basada en la teoría de grafos, cuyos resultados se visualizarán en los ejes de las coordenadas y la cantidad de clústeres identificados junto con la cantidad de puntos que conforma cada clúster se mostrarán en la tabla de resultados. De igual manera, se habilitará el botón de *Segmentos Lineales*, como se presenta en la Figura 100.

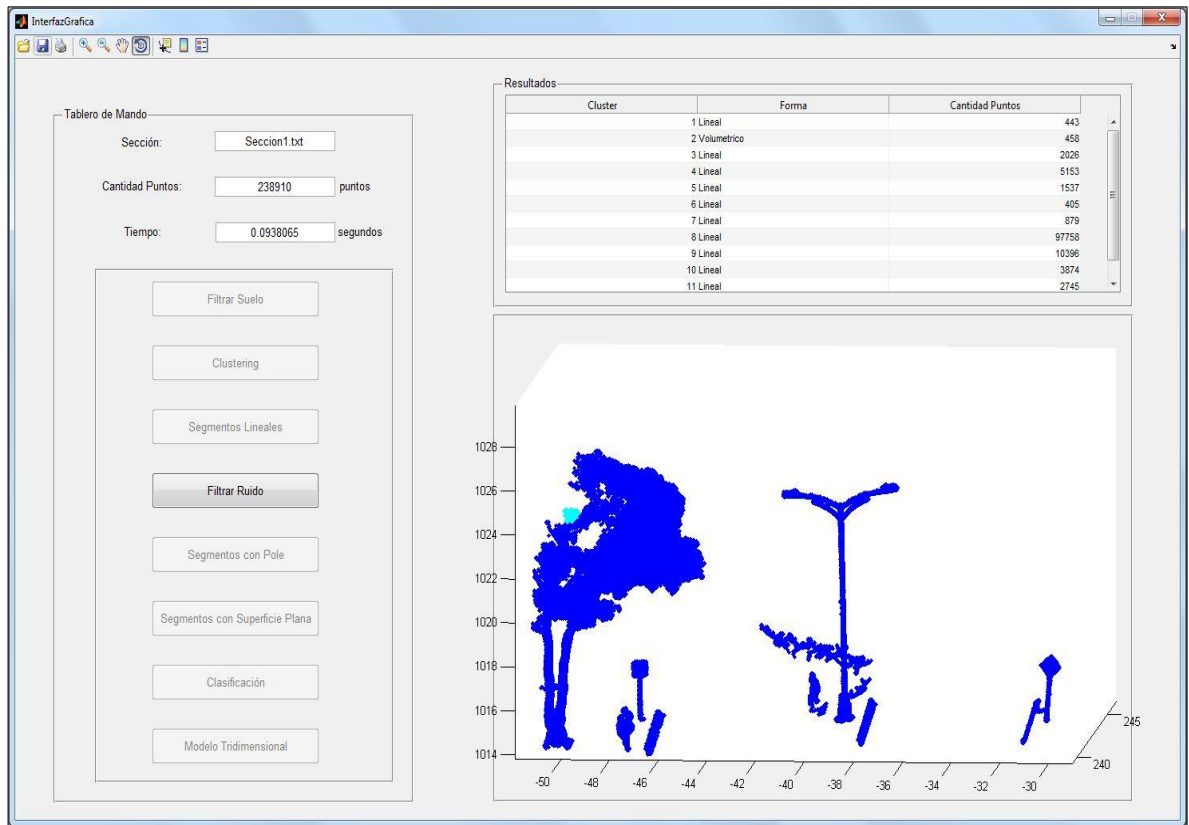
Figura 100. Resultado de la segmentación basada en Clustering



Fuente: Elaboración propia

Luego de ejecutar la opción de *Segmentos Lineales*, se realizará la segmentación basada en componentes principales – PCA, para identificar los segmentos que tienen forma lineal, plana y volumétrica. Los resultados se visualizarán en los ejes de las coordenadas y los segmentos identificados con su forma característica se mostrarán en la tabla de resultados. Igualmente, se habilitará el botón de *Filtrar Ruido*, como se muestra en la Figura 101.

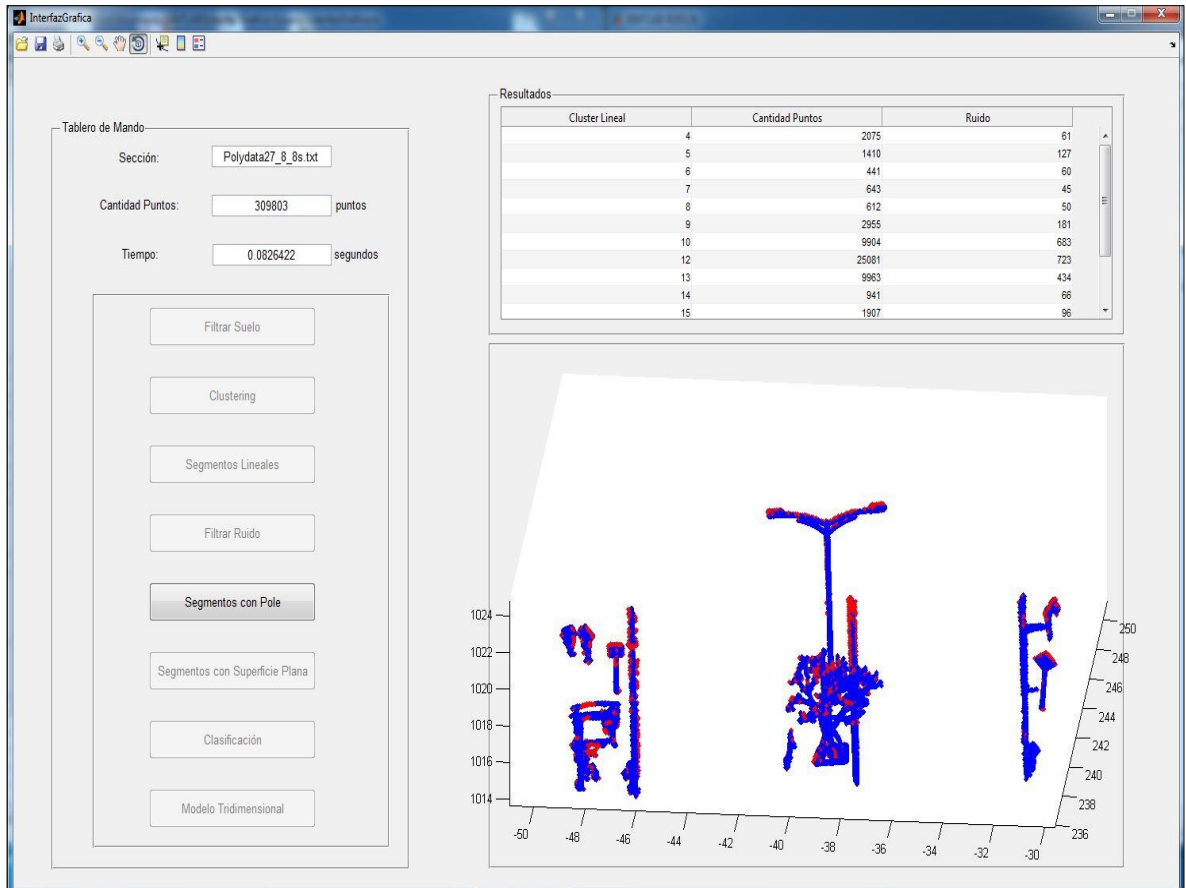
Figura 101. Resultado de la segmentación basada en PCA para identificar los segmentos lineales, planos y volumétricos



Fuente: Elaboración propia

Al hacer clic en la opción de *Filtrar Ruido*, se ejecutará un algoritmo que basado en la densidad de los segmentos que identificará a aquellos puntos que se encuentran muy alejados de la distancia promedio entre ellos. Este resultado se mostrará en el eje de coordenadas y en la tabla adyacente. En seguida se habilitará la opción de *Segmentos con Poste*, como se visualiza en la Figura 102.

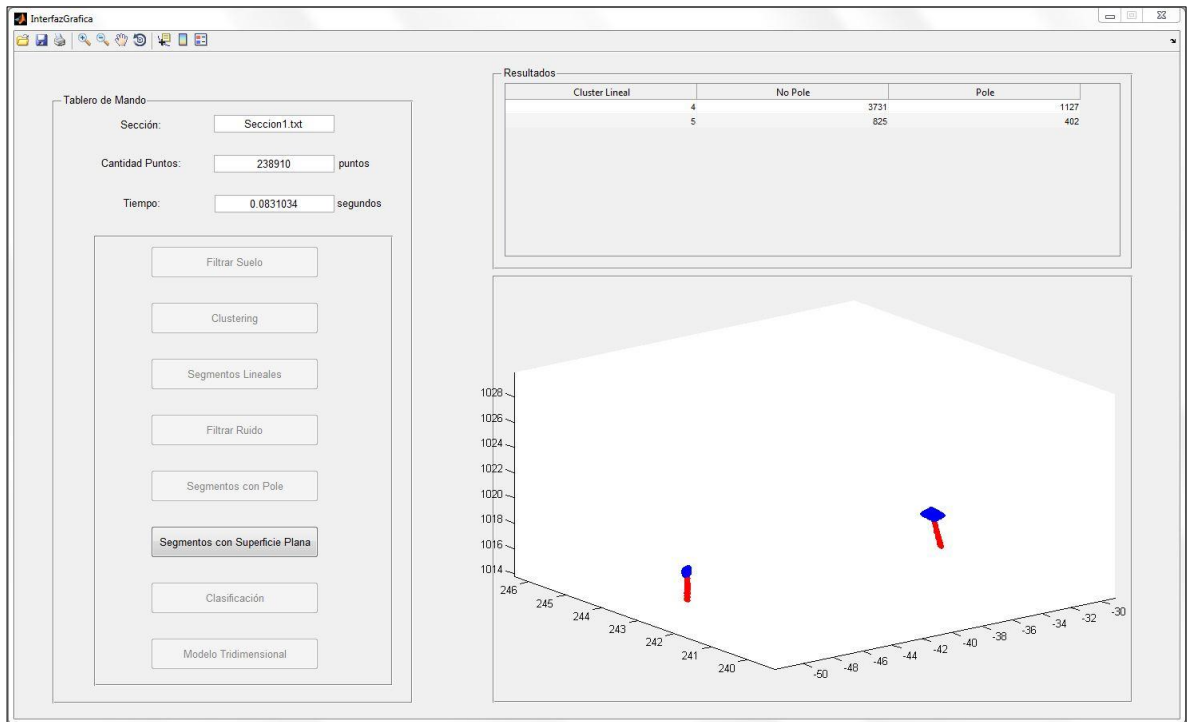
Figura 102. Resultado de la filtrado del Ruido en los segmentos lineales



Fuente 1: Elaboración propia

Cuando se selecciona la opción de *Segmentos con Poste*, se lleva a cabo la ejecución de un método que se basa en dividir los segmentos en deciles, y evaluar cada decil por separado, con el fin de identificar cuáles de ellos son parte de un poste. Al mismo tiempo se habilitará la opción de *Segmento con Superficies planas*, como se presenta en la Figura 103.

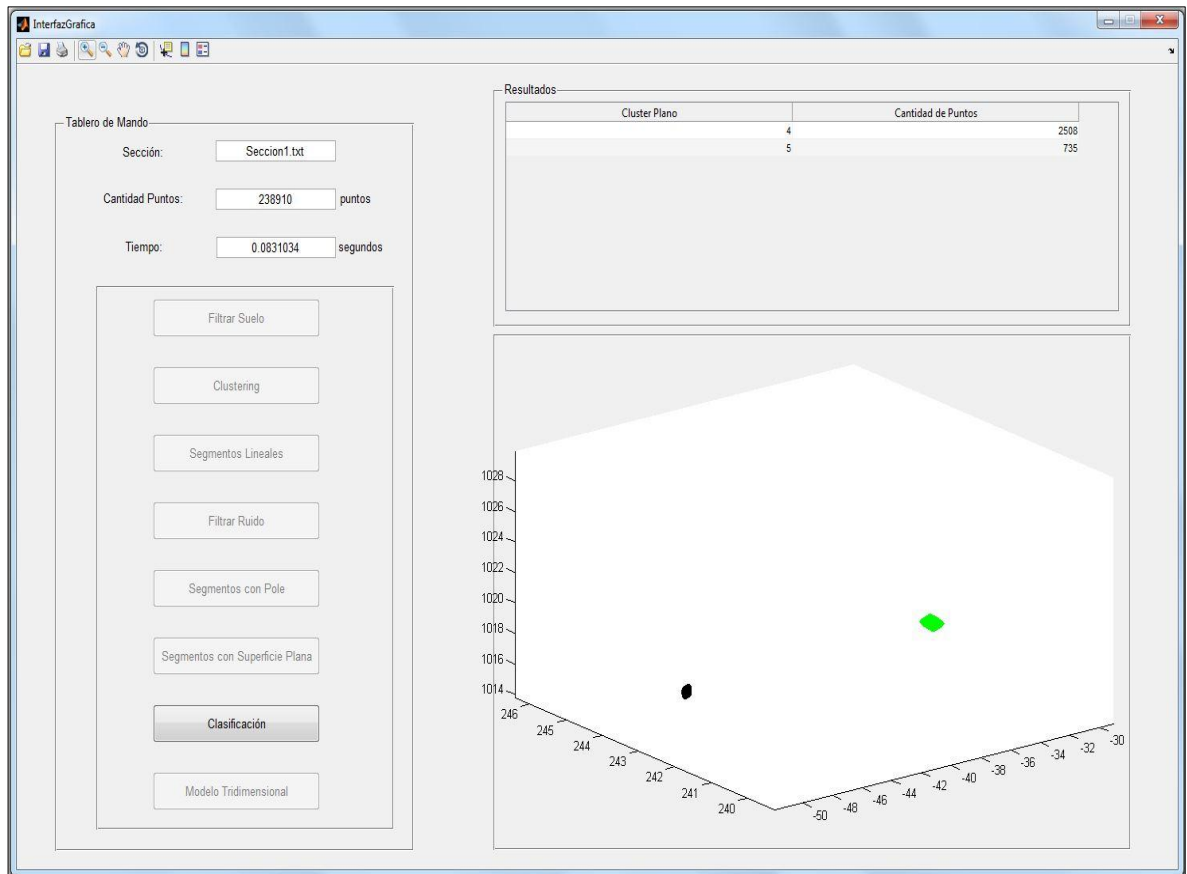
Figura 103. Resultado de la segmentación para identificar segmentos con postes



Fuente: Elaboración propia

Después de hacer clic en la opción de *Superficies planas*, se realizará la ejecución del algoritmo basado en el método de RANSAC para identificar cuáles segmentos están compuestos de superficies planas. Este resultado se visualizará en el eje de coordenadas y en la tabla, tal como se muestra en la Figura 104, en seguida se habilitará la opción de *Clasificación*.

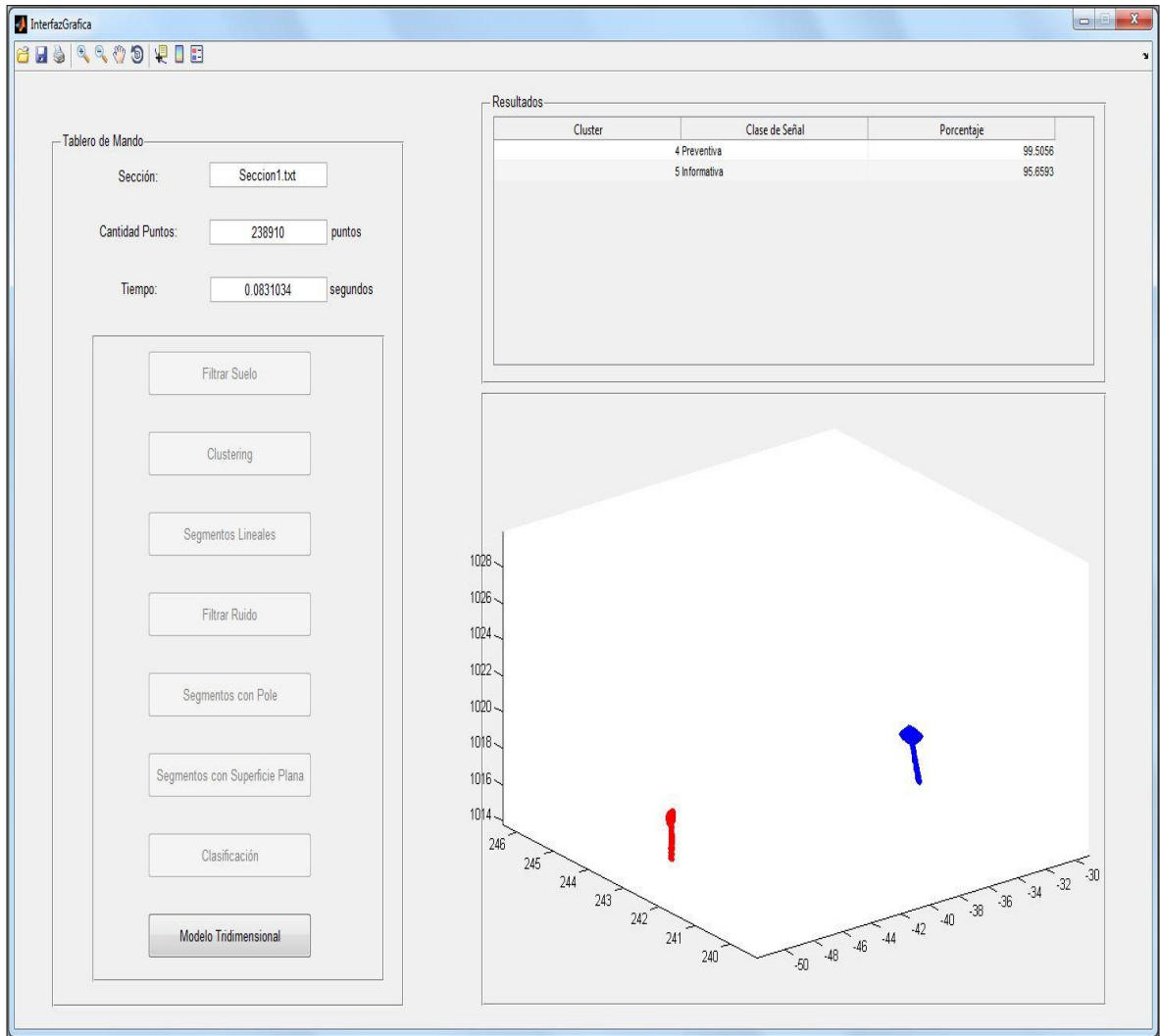
Figura 104. Resultado de la segmentación basada en RANSAC para identificar segmentos con superficies planas



Fuente: Elaboración propia

Al hacer clic en el botón de *Clasificación*, se lleva a cabo el reconocimiento de las señales de tránsito en los segmentos que están conformados en una parte por un poste y en la otra por una superficie plana. Los resultados se mostrarán en el eje coordenadas donde se dibujarán las señales de tránsito, donde cada tipo tendrá un color diferente, como se visualiza en la Figura 105, de igual manera se habilitará la opción de *Modelo Tridimensional*.

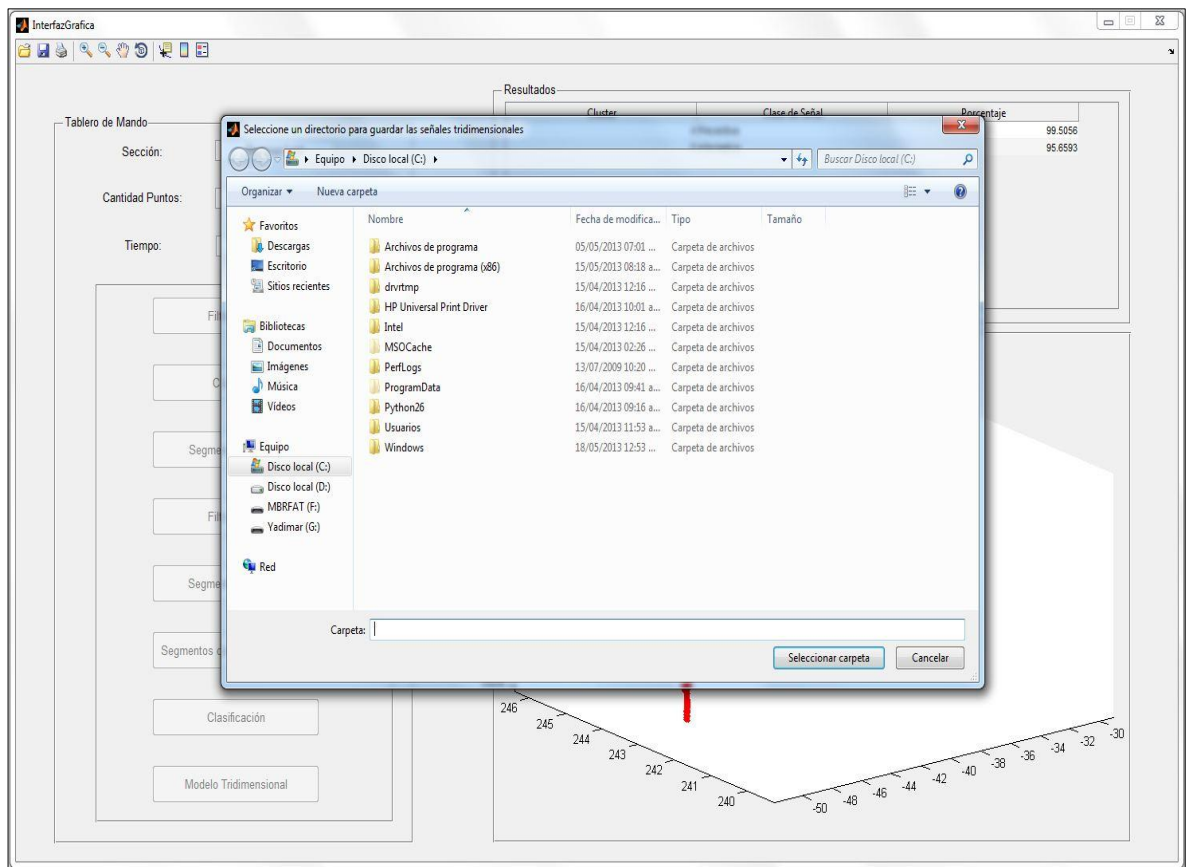
Figura 105. Resultado de la Clasificación de las señales de tránsito



Fuente: Elaboración propia

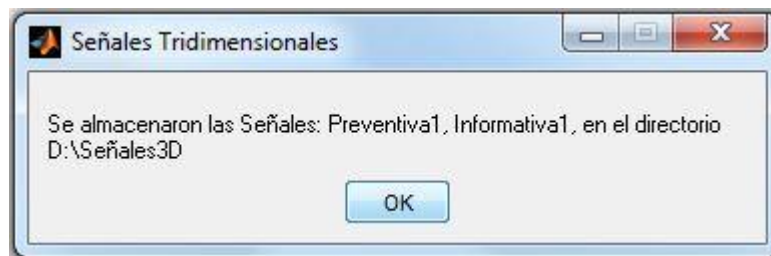
Para generar el modelo tridimensional de las señales de tránsito en el estándar de CityGML, se hace clic en la opción de *Modelo Tridimensional*, e inmediatamente se levantará una ventana solicitando que se escoja el directorio donde va a almacenar estos modelos, tal como se muestra en Figura 106. Después de guardar las señales en el directorio, se levantará un mensaje mostrando las cantidades de señales de tránsito almacenadas y la ruta del directorio donde se encuentran. Ver Figura 107.

Figura 106. Selección del directorio para almacenar los modelos 3D de las señales de tránsito



Fuente: Elaboración propia

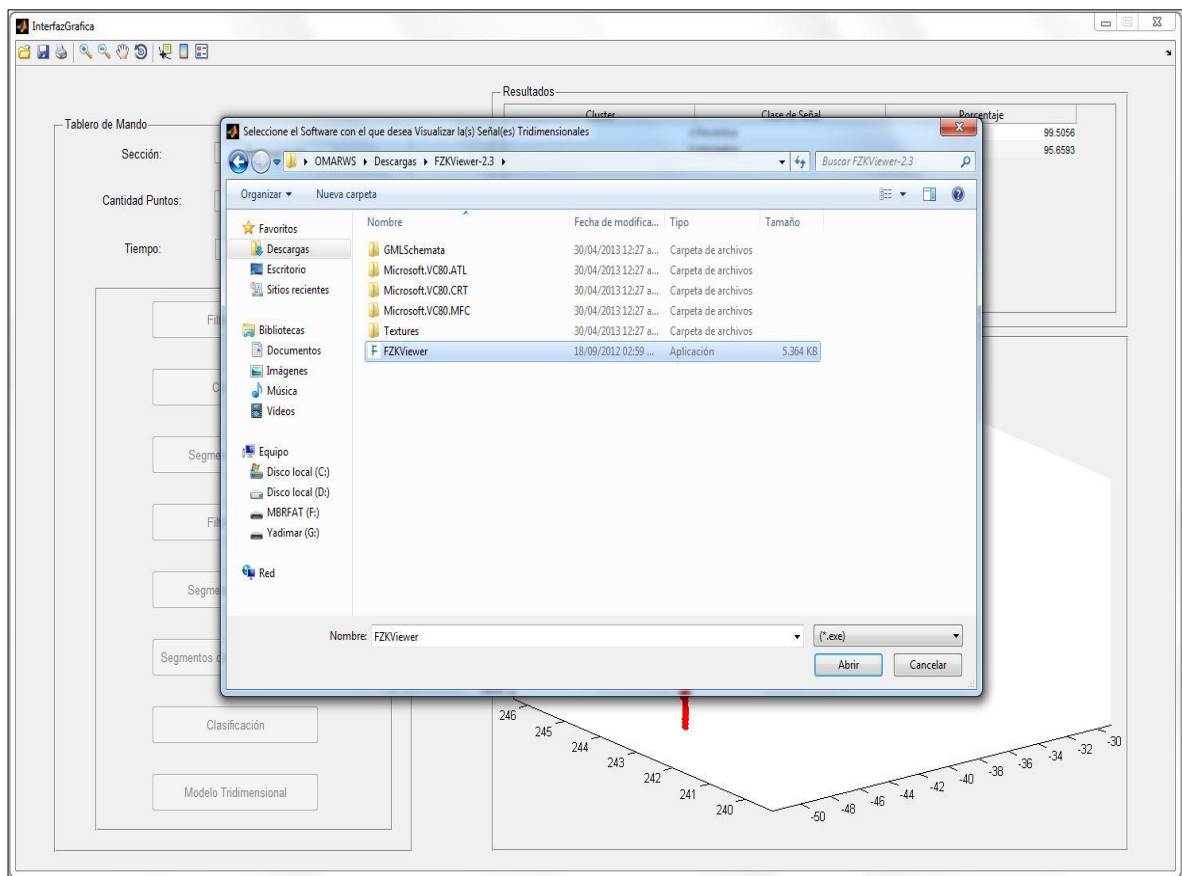
Figura 107. Ruta del directorio y cantidad de señales de tránsito almacenadas



Fuente: Elaboración propia

Después de que se han almacenado los archivos CityGML de los modelos 3D de las señales de tránsito, se levantará otra ventana solicitando el archivo .EXE de la aplicación con la cual se desea reproducir estos modelos como se visualiza en Figura 108.

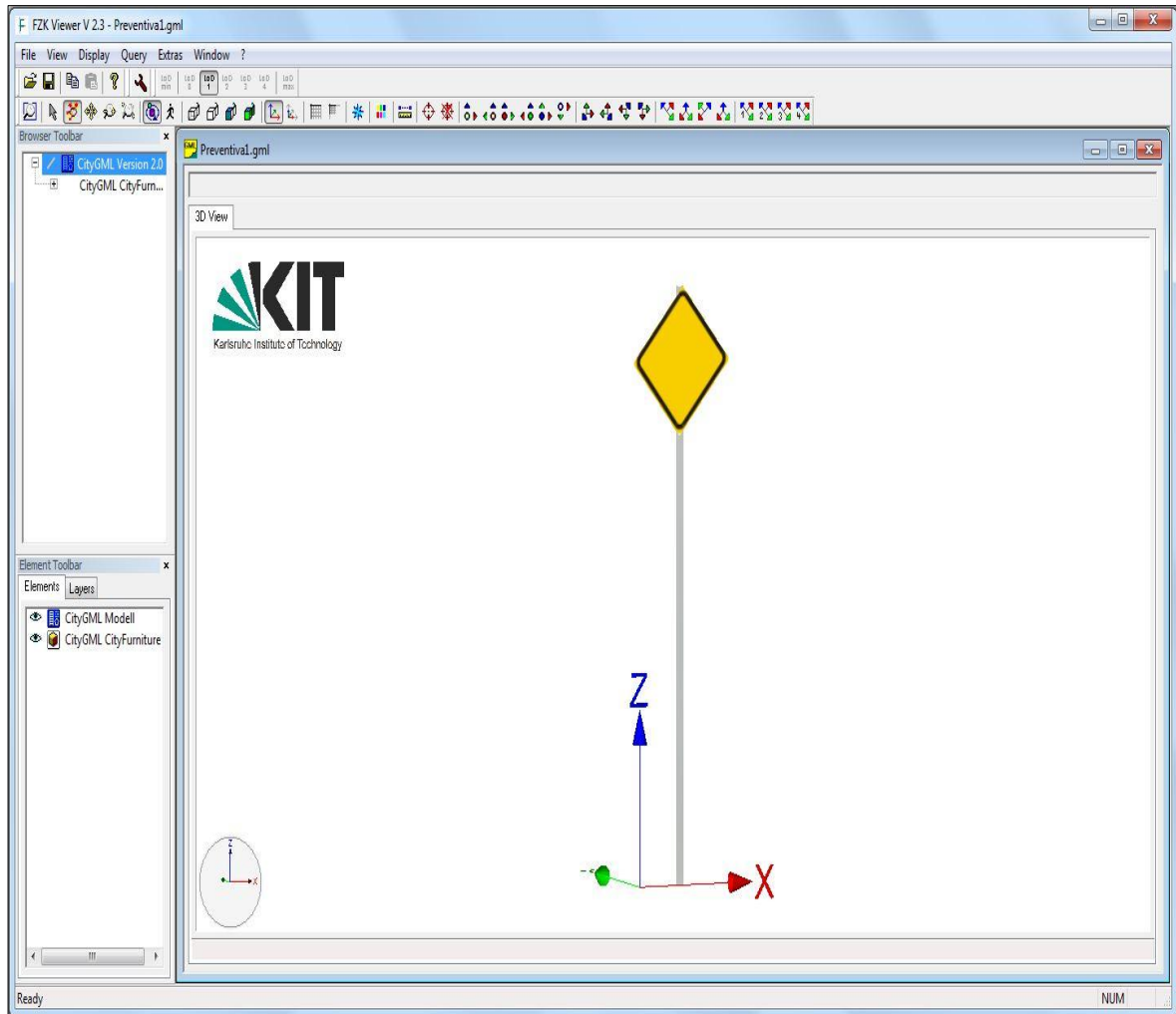
Figura 108. Selección del archivo .EXE de la aplicación que va a reproducir los modelos 3D CityGML



Fuente: Elaboración propia

En este caso se usó un software gratuito llamado FZKViewer, desarrollado por el instituto alemán *Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*, el cual permite reproducir varios tipos de formato, entre ellos el de CityGML. Un ejemplo de la visualización de los modelos de las señales de tránsito en la interfaz de FZKViewer se visualiza en la Figura 109.

Figura 109. Interfaz gráfica de FZKViewer



Fuente: Elaboración propia

ANEXO B. ESQUEMA DE UN ARCHIVO CITYGML DE UNA SEÑAL PREVENTIVA

```

- <CityModel xsi:schemaLocation="http://www.opengis.net/citygml/2.0 ./CityGML_2.0/CityGML.xsd">
  <!-- Appearance CityFurniture -->
  - <app:appearanceMember>
    - <app:Appearance>
      - <app:surfaceDataMember>
        - <app:ParameterizedTexture>
          <app:imageURI>PreventivaFront.png</app:imageURI>
          <app:textureType>unknown</app:textureType>
          <app:wrapMode>wrap</app:wrapMode>
          - <app:target uri="#Poligono">
            - <app:TexCoordList>
              - <app:textureCoordinates ring="PoligonoFront">
                0.5 0.0 1.0 0.5 0.5 1.0 0.0 0.5 0.5 0.0
              </app:textureCoordinates>
            </app:TexCoordList>
          </app:target>
        </app:ParameterizedTexture>
      </app:surfaceDataMember>
    </app:Appearance>
  </app:appearanceMember>
  - <app:appearanceMember>
    - <app:Appearance>
      - <app:surfaceDataMember>
        - <app:ParameterizedTexture>
          <app:imageURI>PreventivaBack.png</app:imageURI>
          <app:textureType>unknown</app:textureType>
          <app:wrapMode>wrap</app:wrapMode>
          - <app:target uri="#Poligono">
            - <app:TexCoordList>
              - <app:textureCoordinates ring="PoligonoBack">
                0.5 0.0 1.0 0.5 0.5 1.0 0.0 0.5 0.5 0.0
              </app:textureCoordinates>
            </app:TexCoordList>
          </app:target>
        </app:ParameterizedTexture>
      </app:surfaceDataMember>
    </app:Appearance>
  </app:appearanceMember>
  - <app:appearanceMember>
    - <app:Appearance>
      - <app:surfaceDataMember>
        - <app:ParameterizedTexture>
          <app:imageURI>Poste.png</app:imageURI>
          <app:textureType>unknown</app:textureType>
          <app:wrapMode>wrap</app:wrapMode>
          - <app:target uri="#Poligono">
            - <app:TexCoordList>

```

```

        -<app:textureCoordinates ring="Poste1">
            0 0 0 1 1 1 1 0 0 0
        </app:textureCoordinates>
    </app:TexCoordList>
</app:target>
</app:ParameterizedTexture>
</app:surfaceDataMember>
</app:Appearance>
</app:appearanceMember>
-<app:appearanceMember>
-<app:Appearance>
    -<app:surfaceDataMember>
        -<app:ParameterizedTexture>
            <app:imageURI>Poste.png</app:imageURI>
            <app:textureType>unknown</app:textureType>
            <app:wrapMode>wrap</app:wrapMode>
        -<app:target uri="#Poligono">
            -<app:TexCoordList>
                -<app:textureCoordinates ring="Poste2">
                    0 0 0 1 1 1 1 0 0 0
                </app:textureCoordinates>
            </app:TexCoordList>
        </app:target>
    </app:ParameterizedTexture>
</app:surfaceDataMember>
</app:Appearance>
</app:appearanceMember>
<!-- CityFurniture Signale -->
-<core:cityObjectMember>
    -<frn:CityFurniture gml:id="senal">
        <frn:function>1540</frn:function>
    -<frn:lod1Geometry>
        -<gml:MultiSurface>
            -<gml:surfaceMember>
                -<gml:Polygon gml:id="Poligono">
                    -<gml:exterior>
                        -<gml:LinearRing gml:id="PoligonoFront">
                            <gml:pos>0.36 0 2.52</gml:pos>
                            <gml:pos>-0.05 0 2.94</gml:pos>
                            <gml:pos>0.4 0 3.36</gml:pos>
                            <gml:pos>0.8 0 2.94</gml:pos>
                            <gml:pos>0.36 0 2.52</gml:pos>
                        </gml:LinearRing>
                    </gml:exterior>
                </gml:Polygon>
            </gml:surfaceMember>
        -<gml:surfaceMember>
            -<gml:Polygon gml:id="Poligono">
                -<gml:exterior>

```

```

    - <gml:LinearRing gml:id="PoligonoBack">
      <gml:pos>0.36 0.002 2.52</gml:pos>
      <gml:pos>-0.05 0.002 2.94</gml:pos>
      <gml:pos>0.4 0.002 3.36</gml:pos>
      <gml:pos>0.8 0.002 2.94</gml:pos>
      <gml:pos>0.36 0.002 2.52</gml:pos>
    </gml:LinearRing>
  </gml:exterior>
</gml:Polygon>
</gml:surfaceMember>
- <gml:surfaceMember>
  - <gml:Polygon gml:id="Poligono">
    - <gml:exterior>
      - <gml:LinearRing gml:id="Poste1">
        <gml:pos>0.4 0.002 3.36</gml:pos>
        <gml:pos>0.4 0.005 0</gml:pos>
        <gml:pos>0.35 0.005 0</gml:pos>
        <gml:pos>0.35 0.005 3.36</gml:pos>
        <gml:pos>0.4 0.002 3.36</gml:pos>
      </gml:LinearRing>
    </gml:exterior>
  </gml:Polygon>
</gml:surfaceMember>
- <gml:surfaceMember>
  - <gml:Polygon gml:id="Poligono">
    - <gml:exterior>
      - <gml:LinearRing gml:id="Poste2">
        <gml:pos>0.35 0.002 3.36</gml:pos>
        <gml:pos>0.35 0.005 0</gml:pos>
        <gml:pos>0.35 0.05 0</gml:pos>
        <gml:pos>0.35 0.05 3.36</gml:pos>
        <gml:pos>0.35 0.002 3.36</gml:pos>
      </gml:LinearRing>
    </gml:exterior>
  </gml:Polygon>
</gml:surfaceMember>
</gml:MultiSurface>
</frn:lod1Geometry>
</frn:CityFurniture>
</core:cityObjectMember>
<!-- End CityFurniture Signale -->
</CityModel>

```